

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

POBOLJŠANJE PROCESA DIFUZIJSKOG STVARANJA
KARBIDNIH SLOJEVA

MAGISTARSKI RAD

MENTOR:

PROF.DR. MLADEN STUPNIŠEK

ĐURĐICA GORŠČAK

ZAGREB, 2004.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK: 621.785.52

Ključne riječi: pougljičavanje, aktivnost ugljika, matematički model, difuzija, karbidni slojevi

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarsstvo

Institucija u kojoj je rad izrađen: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

Mentor rada: prof.dr.sc. Mladen Stupnišek

Broj stranica: 110

Broj slika: 83

Broj tablica: 11

**Broj korištenih
bibliografskih jedinica:** 13

Datum obrane:

Povjerenstvo: prof.dr.sc. Vinko Ivušić, FSB, Zagreb
prof.dr.sc. Mladen Stupnišek, FSB, Zagreb
prof.dr.sc. Božo Smoljan, Tehnički fakultet, Rijeka

**Institucija u kojoj je rad
pohranjen:** Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu
Nacionalna i sveučilišna knjižnica



Zagreb, 28. listopada 1999.

ZADATAK ZA MAGISTARSKI RAD

Kandidat: **Đurđica Gorščak**, dipl. inž. strojarstva

Zadatak: **POBOLJŠANJE PROCESA DIFUZIJSKOG STVARANJA KARBIDNIH SLOJEVA**

Pri procesu difuzijskog stvaranja karbidnih slojeva na čeliku istovremeno se ispod karbidnog sloja odvija proces djelomičnog razugličenja čelika. To ima za posljedicu nastajanje mekšeg međusloja čime se oslabi podloga tvrdom sloju. U cilju ublažavanja ove prateće pojave razvija se postupak prethodnog pougličavanja kojim se u površinski sloj čelika unese dodatni ugljik. Ovako unešeni dodatni ugljik sudjeluje u stvaranju karbida u slijedećoj etapi postupka. Zato je u površinski sloj čelika potrebno unijeti optimalnu količinu ugljika koja je potrebna za nastajanje karbidnog sloja zahtijevane debljine.

U magistarskom radu treba:

- izraditi postupak izračunavanja potrebne specifične količine ugljika u ovisnosti o vrsti i debljini karbidnog sloja,
- izraditi program za simuliranje procesa pougličavanja i izračunavanje količine unešenog ugljika,
- za odabrane primjere izvršiti optimiranje procesa prethodnog pougličavanja,
- u eksperimentalnom dijelu provesti probne obradbe i prateća ispitivanja te rezultate usporediti s rezultatima proračuna.

Zadatak zadan: 09. 11. 1999.

Rad predan: _____

Voditelj Odbora za poslijediplomski
studij i doktorate:

Dr. dr. Božo Vranješ, red. prof.

Voditelj magistarskog rada:

Dr. sc. Mladen Stupnišek, red. prof.



ZAHVALA

Zahvaljujem voditelju rada prof.dr.sc. Mladenu Stupnišku, na pruženoj pomoći, savjetima i smjernicama.

Veliku zahvalu upućujem prof.dr.sc. Mariu Essertu, na pomoći prilikom izrade računalskog programa te na svim riječima poticaja i ohrabrenja koje su mi jako puno značile. Također se od srca zahvaljujem doc.dr.sc. Lidiji Ćurković, na nesebičnoj pomoći pri kemijskoj analizi uzoraka, dobroti i prijateljstvu.

Kolegama i prijateljima, dr.sc. Dragutinu Lisjaku, Marijanu Igreću, dipl.ing, mr. sc. Željku Alaru i ing. Ani Bezmalinović zahvaljujem na pomoći u pripremi i analizi uzoraka te na savjetima pri izradi rada.

Tvrtki Končar-Alati d.d. u kojoj radim zahvaljujem na podršci i pomoći tijekom izrade rada.

Puno mi je značila i podrška svih mojih prijatelja i suradnika iz grupe Electrolux širom svijeta.

Svojoj obitelji želim zahvaliti na svojoj ljubavi, razumijevanju i pomoći.

Đurđica Goršćak

V

2.4	Izrada računalskog programa za simuliranje pougljičavanja.....	41
2.4.1	Razvoj na području računalskih programa za simuliranje pougljičavanja.....	41
2.4.1.1	Izrada programa za izračun potrebne mase ugljika kod pougljičavanja prije difuzijskog stvaranja karbida.....	44
2.4.1.2	Izrada programa za simuliranje toka pougljičavanja u sklopu cementiranja	50
3	EKSPERIMENTALNI DIO	64
3.1	Pougljičavanje prije difuzijskog stvaranja karbida.....	64
3.1.1	Analiza eksperimentalnih rezultata kod pougljičavanja prije stvaranja karbida.....	70
3.2	Pougljičavanje u sklopu postupka cementiranja	71
3.2.1	Analiza eksperimentalnih rezultata kod pougljičavanja u sklopu postupka cementiranja	95
4	ZAKLJUČCI	100
PRILOZI	102
LITERATURA	110

PREDGOVOR

Metodama difuzijskog stvaranja karbida dobivaju se površinski slojevi koji uglavnom služe za zaštitu od trošenja. Međutim, kod tog postupka istovremeno dolazi do trošenja ugljika u dubljim slojevima, koji služe kao temelj za površinski difuzijski sloj karbida. Zadatak je ovoga rada definiranje prikladnog postupka pougljičavanja koji se provodi prije difuzijskog stvaranja karbida, a čiji je cilj kompenziranje kasnijeg gubitka ugljika u postupku stvaranja karbida. Kombinacijom postupka pougljičavanja prije stvaranja karbida i postupka difuzijskog stvaranja karbida dobivaju se karbidni slojevi s dobrim temeljem. Stoga kod ovih slojeva neće dolaziti do ljuštenja, do utisnuća površine i do drugih nepravilnosti koje mogu biti izazvane ugljikom osiromašenim slojem ispod karbidnog sloja.

Kako su zakonitosti difuzije ugljika u čelik iste za postupak pougljičavanja prije stvaranja karbida i za postupak pougljičavanja u sklopu cementiranja, rad je naknadno proširen i na postupak pougljičavanja u sklopu postupka cementiranja. Postupci pougljičavanja u sklopu cementiranja još se uvijek često vode na temelju empirije, uslijed čega se u procesu mogu događati gubici uslijed predugoga trajanja procesa (nepotrebno povećani utrošak energenata i tvari za pougljičavanje) ili pak, uslijed prekratkoga trajanja i neprikladnih parametara procesa, kvaliteta i dubina slojeva nije odgovarajuća. Postavljanjem ispravnih temelja za vođenje procesa, definiranjem svih utjecajnih parametara procesa te vođenjem procesa u skladu s definiranim mogu se postići značajne uštede i poboljšanje kvalitete dobivenih slojeva. Proizvođači opreme za pougljičavanje uglavnom su razvili pakete za postupke pougljičavanja, koji se temelje na kombinaciji teorijskih i empirijskih postavki procesa. Cilj ovoga rada je postavljanje višefaznog procesa pougljičavanja, koji omogućuje precizno kontroliranje nastajanja sloja te njegovoga željenog završnog profila. Oba se postupka pougljičavanja temelje na principu aktivnosti ugljika, za koji je ranije dokazana primjenjivost kod ovih postupaka.

SAŽETAK

U radu su postavljeni fizikalni principi za odvijanje procesa pougljičavanja te su analizirani utjecaji pojedinih parametara na debljinu pougljičenog sloja te na njegovu kvalitetu. Umjesto modela koji se temelji na difuziji temeljem razlike u koncentracijama, postavljen je model koji se temelji na aktivnosti ugljika. Utvrđeno je da dobiveni rezultati dobro odgovaraju postavljenom matematičkom modelu postupka pougljičavanja te se stoga izrađeni računalni program može upotrijebiti za praćenje mehanizama postupka pougljičavanja te analizu utjecaja parametara na ekonomičnost postupka kao i na dubinu i kvalitetu dobivenih slojeva, a time i za definiranje parametara kod upravljanja procesom pougljičavanja.

Ključne riječi: pougljičavanje, aktivnost ugljika, matematički model, difuzija, karbidni slojevi

SUMMARY

In the work, physical principles for managing the carburizing process have been established. The influence of the particular parameters to the depth of the carburized layer and to its quality have been analyzed. Instead of the model based on diffusion due to difference in concentrations, a model based on diffusion due to difference in carbon activity has been established. It has been proven that the results match the mathematical model of the carburizing process. Therefore, the computer program can be used for monitoring of the carburizing process mechanism and for analysis of influence of the parameters on process efficacy as well as on the process capability and on the quality of the obtained layers. Therefore, it can be used for defining of parameters for running of the carburizing process.

Key words: carburizing, carbon activity, mathematical model, diffusion, carbide layers

POPIS SLIKA

Broj slike	Naziv	Str.
Slika 1.	Ovisnost termodinamičke aktivnosti ugljika o temperaturi i sadržaju ugljika u sustavu Fe-C za područje austenita	4
Slika 2.	Prikaz stanja nakon završenog procesa stvaranja karbida	6
Slika 3.	Kvalitativna mikroanaliza presjeka karbidnog sloja i djelomično razugljičene zone čelika.....	6
Slika 4.	Rastvorljivost u sustavu C-Fe-V pri 1000 °C	7
Slika 5.	Mikrosnimka presjeka površine konvencionalno (plinski) pougljičenog sloja.....	11
Slika 6.	Mikrosnimka presjeka površine pougljičene plazma postupkom	11
Slika 7.	Prikaz stanja u Fe-C dijagramu nakon pougljičavanja	13
Slika 8.	Utjecaj temperature austenitizacije na strukturno stanje pougljičenog čelika.....	14
Slika 9.	Vrste kaljenja nakon pougljičavanja.....	15
Slika 10.	Dijagram rubne kaljivosti čelika	18
Slika 11.	Pad tvrdoće u ovisnosti o temperaturi i trajanju popuštanja	19
Slika 12.	Prikaz procesa pougljičavanja čelika	21
Slika 13.	Prikaz koeficijenta difuzije, β (K) u sustavu (CO+CO ₂) - (H ₂ +H ₂ O+CH ₄) - N ₂ , kod 900 °C	22
Slika 14.	Shematski prikaz vrijednosti koje se zahtijevaju kod pougljičavanja čelika.....	24
Slika 15.	Prikaz toka ugljika kod postupka pougljičavanja	26
Slika 16.	Kvalitativni odnos aktivnosti i koncentracije ugljika u austenitu	27
Slika 17.	Utjecaj rednog broja elemenata u periodičkom sustavu na faktor aktivnosti ugljika.....	27
Slika 18.	Dijagram uz novi model pougljičavanja	28
Slika 19.	Shematski prikaz nepovoljnih profila toka ugljika dobivenih pougljičavanjem s dva C-potencijala, C _R i C ₀	31
Slika 20.	Shematski prikaz (povoljnog) profila toka ugljika za dvije postavljene vrijednosti, C _f i C ₀	32
Slika 21.	Profil toka ugljika i tvrdoće tijekom računalom vođenog procesa pougljičavanja	33

Slika 22.	Primjer određivanja C-potencijala na temelju mjerenja CO ₂	35
Slika 23.	Shema mjerenja i reguliranja C-potencijala na osnovi mjerenja temperature rošenja u plinskoj atmosferi metanol/etilacetat	37
Slika 24.	Shema mjerenja i regulacije C-potencijala pomoću kisikove sonde	40
Slika 25.	Ekran paketa Dictra koji se nalazi u sklopu softvera Thermo-Calc.....	42
Slika 26.	Završni stupanj u programu PUPA, uz konstantni C-potencijal	43
Slika 27.	Program za izračun potrošnje ugljika za stvaranje karbida u sloju s konstantnim tokom (profilom) ugljika	45
Slika 28.	Prikaz podjele sloja u kojemu se izračunava masa unesenog ugljika	46
Slika 29.	Pougljičavanje prije stvaranja karbida V ₈ C ₇ na Č1530, debljine 20 μm, na temperaturi 930 °C, uz f = 0,9	47
Slika 30.	Pougljičavanje prije stvaranja karbida V ₈ C ₇ na Č1530, debljine 10 μm, na temperaturi 930 °C, uz f = 0,9	48
Slika 31.	Pougljičavanje prije stvaranja karbida Cr ₇ C ₃ na Č1530, debljine 30 μm, na temperaturi 930 °C, uz f = 0,95	48
Slika 32.	Pougljičavanje prije stvaranja karbida Cr ₇ C ₃ na Č3840, debljine 10 μm, na temperaturi 930 °C, uz f = 0,9	49
Slika 33.	Pougljičavanje prije stvaranja karbida Cr ₇ C ₃ na Č3840, debljine 5 μm, na temperaturi 930 °C, uz f = 0,9	49
Slika 34.	Prikaz koraka vođenja procesa pougljičavanja	51
Slika 35.	Završni profil sadržaja ugljika ovisno o udaljenosti od površine	54
Slika 36.	Pougljičavanje Č1221, uz f ₁ =0,9, f ₂ =0,9, f ₃ =0,97, Edp=0,60, uz trajanje procesa 150 minuta	58
Slika 37.	Pougljičavanje Č1221, uz f ₁ =0,9, f ₂ =0,9, f ₃ =0,97, Edp=0,60, uz trajanje procesa 200 minuta	59
Slika 38.	Pougljičavanje Č1221, uz f ₁ =0,9, f ₂ =0,9, f ₃ =0,97, Edp=0,60, uz trajanje procesa 250 minuta	59
Slika 39.	Pougljičavanje Č1221, uz f ₁ =0,9, f ₂ =0,9, f ₃ =0,97, Edp=0,60, uz trajanje procesa 300 minuta	60
Slika 40.	Pougljičavanje Č1221, uz f ₁ =0,9, f ₂ =0,9, f ₃ =0,98, Edp=0,80, uz trajanje procesa 330 minuta	61
Slika 41.	Pougljičavanje Č4320, uz f ₁ =0,9, f ₂ =0,9, f ₃ =0,80, Edp=0,80, uz trajanje procesa 330 minuta	61
Slika 42.	Pougljičavanje Č5421, uz f ₁ =0,9, f ₂ =0,9, f ₃ =0,80, Edp=0,80, uz trajanje procesa 330 minuta	62

Slika 43.	Pougljičavanje Č1221, uz $f_1=0,9$, $f_2=0,9$, $f_3=0,99$, $Ed_p=1,00$, uz trajanje procesa 420 minuta	62
Slika 44.	Pougljičavanje Č4320, uz $f_1=0,9$, $f_2=0,9$, $f_3=0,99$, $Ed_p=1,00$, uz trajanje procesa 420 minuta	63
Slika 45.	Pougljičavanje Č5421, uz $f_1=0,9$, $f_2=0,9$, $f_3=0,99$, $Ed_p=1,00$, uz trajanje procesa 420 minuta	63
Slika 46.	Uzorak za pougljičavanje prije stvaranja karbida	64
Slika 47.	Prikaz izmjerenog toka ugljika nakon pougljičavanja, uzorak A, Č3840	65
Slika 48.	Dijagram toka ugljika u čeliku kod simulacija postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu (dio za pougljičavanje prije stvaranja karbida), uzorak A, Č3840 uz $C_{p1} = 1,10$, $T_1 = 930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 845\text{ }^{\circ}\text{C}$	66
Slika 49.	Usporedbeni prikaz izmjerenog toka ugljika i toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu, uzorak A, Č 3840, $C_p = 1,10$, $T_1 = 930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 845\text{ }^{\circ}\text{C}$	67
Slika 50.	Dijagram toka ugljika u čeliku kod simulacije postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu (dio za pougljičavanje prije stvaranja karbida), uzorak B, Č4751 uz $C_p = 1,10$, $T_1 = 930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 845\text{ }^{\circ}\text{C}$	68
Slika 51.	Usporedbeni prikaz izmjerenog toka ugljika i toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu, uzorak B, Č 4751, $C_p = 1,10$, $T_1 = 930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 845\text{ }^{\circ}\text{C}$	69
Slika 52.	Prikaz izmjerenih i simuliranih tokova ugljika za uzorke A, B	70
Slika 53.	Uzorak za pougljičavanje u sklopu postupka cementiranja	72
Slika 54.	Dijagram izmjerenog toka tvrdoće, uzorak C, Č4320	74
Slika 55.	Dijagram izmjerenog toka ugljika, uzorak C, Č4320	75
Slika 56.	Dijagram izmjerenog toka tvrdoće i toka ugljika, uzorak C, Č4320	75
Slika 57.	Završni ekran simuliranja postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom paketu, uzorak C, Č4320, na $Ed_p=1,20\text{ mm}$, $C_{p1}=1,10$, $C_{p2}=0,80$, $C_{p3}=0,85$, zadani $C_R=0,80-0,85$, trajanje postupka 620 minuta	76
Slika 58.	Usporedbeni prikaz izmjerenog toka ugljika i toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu, uzorak C, Č4320	76
Slika 59.	Prikaz vrijednosti tvrdoće i sadržaja ugljika u Burns-ovom dijagramu, uzorak C, Č4320	77
Slika 60.	Završni ekran simuliranja postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom paketu, uzorak C, Č4320, na $Ed_p=1,20\text{ mm}$, uz $C_{p1}=1,10$, $C_{p2}=0,60$,	

	Cp ₂ =0,65, T ₁ =930 °C, T ₁ =850 °C uz C _R = 0,60- 0,65, trajanje postupka 620 minuta.....	78
Slika 61.	Usporedbeni prikaz izmjerenog toka ugljika i toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka pougljičavanja u vlastitom računalnom programu, uzorak C, Č4320, na Edp=1,20 mm, uz Cp ₁ =1,10, Cp ₂ =0,60, T ₁ =930 °C, T ₁ =850 °C, uz C _R =0,60- 0,65.....	79
Slika 62.	Dijagram izmjerenog toka mikrotvrdoće u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak D, Č4320	80
Slika 63.	Dijagram izmjerenog toka ugljika, uzorak D, Č4320	81
Slika 64.	Dijagram izmjerenog toka mikrotvrdoće i ugljika, uzorak D, Č4320	82
Slika 65.	Završni ekran simuliranja postupka pougljičavanja u vlastitom računalnom programu, uzorak D, Č4320, Cp ₁ =1,15, Cp ₂ =0,8, Cp ₃ =0,85, T ₁ =930 °C, T ₂ =850 °C, Edp = 0,65 mm, uz zadani C _R = 0,8-0,85	82
Slika 66.	Usporedbeni prikaz izmjerenog toka ugljika i toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka pougljičavanja u vlastitom računalnom programu, uzorak D, Č4320, Edp=0,65, Cp=1,15, T ₁ = 930 °C, T ₂ = 850 °C	83
Slika 67.	Prikaz vrijednosti tvrdoće i sadržaja ugljika u Burns-ovom dijagramu, uzorak D, Č4320	84
Slika 68.	Završni ekran simuliranja postupka pougljičavanja u vlastitom računalnom programu, uzorak D, Č4320, Cp ₁ =1,15, Cp ₂ =0,75, Cp ₂ =0,80, T ₁ =930 °C, T ₂ =850 °C, Edp = 0,65 mm., uz zadani C _R = 0,75-0,80, trajanje 180 minuta	84
Slika 69.	Usporedbeni prikaz izmjerenog toka ugljika i toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka pougljičavanja u vlastitom računalnom programu, D, Č4320, Cp ₁ =1,15, Cp ₂ =0,75, T ₁ =930 °C, T ₂ =850 °C, Edp = 0,65 mm, uz C _R = 0,75-0,80	85
Slika 70.	Dijagram toka mikrotvrdoće u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak E, Č4320.....	87
Slika 71.	Dijagram izmjerenog toka ugljika u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak E, Č4320	88
Slika 72.	Dijagram izmjerenog toka mikrotvrdoće i toka ugljika, uzorak E, Č4320	88
Slika 73.	Završni ekran simuliranja postupka pougljičavanja u vlastitom računalnom programu, uzorak E, Č4320, Edp = 0,95 mm, T ₁ =930 °C, T ₂ =840 °C, Cp ₁ =1,15, Cp ₂ =0,80, Cp ₃ =0,85, uz zadani C _R =0,80-0,85, trajanje procesa 330 min	89

Slika 74.	Usporedbeni prikaz izmjerenog toka ugljika i toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka pougljičavanja u vlastitom računalnom programu, uzorak E, Č4320, $Ed_p=0,95$ mm	90
Slika 75.	Prikaz vrijednosti tvrdoće i sadržaja ugljika u Burns-ovom dijagramu, uzorak E, Č4320	90
Slika 76.	Dijagram izmjerenog toka ugljika u ovisnosti od udaljenosti od površine, uzorak F, Č5421	91
Slika 77.	Završni ekran simuliranja postupka pougljičavanja u vlastitom računalnom programu, uzorak F, Č5421, na $Ed_p = 0,80$ mm, $C_{p1}=1,10$, $C_{p2}=0,80$, $C_{p3}=0,85$, $T_1=930$ °C, $T_2=845$ °C, trajanje postupka 370 minuta	92
Slika 78.	Usporedbeni prikaz izmjerenog toka ugljika i toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka pougljičavanja u vlastitom računalnom programu, uzorak F, Č5421, na $Ed_p=0,80$ mm	93
Slika 79.	Završni ekran simuliranja postupka pougljičavanja u vlastitom računalnom programu, uzorak F, Č5421, na $Ed_p = 0,80$ mm, $C_{p1}=1,10$, $C_{p2}=0,70$, $T_1=930$ °C, $T_2=845$ °C, uz zadani $C_R = 0,75-0,80$, trajanje postupka 300 minuta	93
Slika 80.	Usporedbeni prikaz izmjerenog toka ugljika i toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka pougljičavanja u vlastitom računalnom programu, uzorak F, Č5421, na $Ed_p=0,80$ mm, $C_{p1}=1,10$, $C_{p2}=0,70$, $T_1=930$ °C, $T_2=845$ °C, uz zadani $C_R = 0,75-0,80$, trajanje postupka 300 minuta	94
Slika 81.	Prikaz izmjerenih i simuliranih tokova ugljika za uzorke C, D, E i F, uz zadani $C_R = 0,75-0,8$	95
Slika 82.	Prikaz izmjerenih i simuliranih tokova ugljika za uzorke C, D, E i F, uz zadane C_R u skladu s vrijednostima izmjerenim na uzorcima	97
Slika 83.	Prikaz tvrdoća i sadržaja ugljika u Burns-ovom dijagramu, za uzorke C, D, E	98

POPIS TABLICA

Broj tablice	Naziv	Str
Tablica 1.	Podaci o karbidima metala	47
Tablica 2.	Sadržaj ugljika u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak A, Č3840	65
Tablica 3.	Sadržaj ugljika u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak B, Č4751.....	67
Tablica 4.	Tvrdoća pougljičenog uzorka u površinskom sloju u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak C, Č4320	73
Tablica 5.	Izmjereni sadržaj ugljika u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak C, Č4320	74
Tablica 6.	Prikaz vrijednosti tvrdoće i sadržaja ugljika u Burns-ovom dijagramu, uzorak C, Č4320	77
Tablica 7.	Izmjerena mikrotvrdoća u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak D, Č4320.....	80
Tablica 8.	Izmjereni sadržaj ugljika u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak D, Č4320	81
Tablica 9.	Izmjerena mikrotvrdoća u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak E, Č4320	86
Tablica 10.	Izmjereni sadržaj ugljika u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak E, Č4320	87
Tablica 11.	Izmjereni sadržaj ugljika u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak F, Č5421	91

POPIS OZNAKA

d	debljina sloja, m
k	konstanta brzine rasta sloja, m^2/s
t	trajanje procesa, s
C	koncentracija ugljika, %C
x	udaljenost od površine, m
D	koeficijent difuzije ugljika, m^2/s
K	koeficijent prijelaza ugljika, m/s
C_p	C-potencijal atmosfere
$C_{x=0}$	koncentracija ugljika na faznoj granici
a_C^P	aktivnost ugljika na faznoj granici
p_{CO}	parcijalni tlak CO, Pa
T	temperatura, K
K_B	Boudouardova konstanta
a_C	aktivnost ugljika
E	napon kisikove sonde, V
R	opća plinska konstanta, J/mol K
F	Faradayeva konstanta, J/V mol
$p_{O_2}^{Ref}$	referentni parcijalni tlak kisika, Pa
$p_{O_2}^x$	mjereni parcijalni tlak kisika, Pa
$V_{Me_xC_y}$	volumen jediničnog sloja karbida, cm^3
A	jedinična površina, cm^2
$m_{Me_xC_y}$	masa jediničnog sloja karbida, g
$\rho_{Me_xC_y}$	gustoća karbida, g/cm^3
w_C	maseni udio ugljika
C_p	postavni C-potencijal atmosfere
C_r	sadržaj ugljika na površini čelika
C_g	granica čađe
$C_{g\ dop}$	dopuštena granica čađe
f_l	faktor granice čađe
C_k	granica karbida

$C_{k\text{ dop}}$	dopuštena granica karbida
f_2	faktor sniženja C-potencijala ispod granice nastajanja karbida
C_1	završni postotak ugljika
$C_{gr\ 1}$	donja tolerancija završnog C_R
$C_{gr\ 2}$	gornja tolerancija završnog C_R
Edp	efektivna dubina cementiranja
$X_{gr\ 1}, X_{gr\ 2}$	tolerancija za Edp
C_x	najveći C-potencijal ugljika
$C_{x\ max}$	max. dopušteni završni C_x
f_3	faktor tolerancije efektivne dubine cementiranja
C_{xt}	sadržaj ugljika na udaljenosti x u vremenu t
a_{Cxt}	aktivnost ugljika na udaljenosti x u vremenu t

1 UVOD

Pri procesu difuzijskog stvaranja karbidnih slojeva na čeliku istovremeno se ispod karbidnog sloja odvija proces razugljičenja čelika, jer se ugljik iz slojeva čelika koji se nalaze ispod karbidnog sloja "troši" na postupak difuzijskog stvaranja karbida na površini čelika. Time površinski sloj čelika oslabljuje i predstavlja lošu podlogu za karbidni sloj. Uslijed omekšanog površinskog sloja čelika u fazi eksploatacije može doći do utisnuća površine. Stoga je prije provođenja difuzijskih postupaka stvaranja karbida potrebno u čelik unijeti upravo onu količinu ugljika koja upravo nadomješta količinu ugljika koja se naknadno utroši pri difuzijskom stvaranju karbidnih slojeva.

Među difuzijskim postupcima površinske toplinske obrade čelika, cementiranje je jedan od vrlo raširenih postupaka. Postupak cementiranja sastoji se od pougljičavanja, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja. Komercijalni su parametri postupka pougljičavanja razmjerno povoljni. To se odnosi na cijenu opreme (pod čim se podrazumijeva i cijena pripadajućih regulacijskih instrumenata), cijenu plinova koji u postupku sudjeluju te na troškove redovnog održavanja opreme. Kod vođenja procesa pougljičavanja potrebno je dobro poznavanje parametara procesa i njihova utjecaja na rezultate procesa, jer se tako može dobiti optimalna dubina i kvaliteta cementiranog sloja uz ekonomski prihvatljivo trajanje procesa.

Svrha istraživanja u ovom radu jest utvrđivanje potrebne količine unesenog ugljika i trajanja procesa pougljičavanja prije stvaranja karbida radi unosa količine ugljika koja će osigurati zadržavanje dobre baze za karbidni sloj nakon difuzijskog stvaranja karbida te utvrđivanje parametara procesa za vođenje postupka pougljičavanja u sklopu postupka cementiranja.

2 TEORIJSKI DIO

2.1 Postupci difuzijskog stvaranja karbidnih slojeva

2.1.1 Osnove difuzijskog stvaranja karbidnih slojeva

Postupci difuzijskog stvaranja karbidnih slojeva provode se pri temperaturama od 900 do 1100°C u plinskim atmosferama ili češće u solnoj kupki. Solna kupka, osim boraksa, sadrži i jedan od karbidotvornih elemenata, kao što su V, Nb ili Cr (najčešće u obliku ferolegura ili oksida) te odgovarajuće aktivatore [1]. Postupak se prvenstveno primjenjuje za konstrukcijske i alatne čelike. Od konstrukcijskih čelika, najčešća je primjena za čelike za poboljšavanje. U skupini alatnih čelika, postupak se može primijeniti za nelegirane i legirane čelike za rad u hladnom stanju i za alatne čelike za topli rad. Osim za čelike, postupak stvaranja karbidnih slojeva može se primijeniti i za željezne lijevove. Zbog visokog sadržaja ugljika, najčešća je primjena kod nodularnog i perlitnog sivog lijeva. Brzorezni su čelici manje prikladni za primjenu ovog postupka zbog niske termodinamičke aktivnosti ugljika, djelovanja legiranih elemenata i visoke temperature austenitizacije. Kod njih, kao i kod sinteriranih tvrdih metala, primjereniji su postupci prevlačenja (depozicije+taloženja), iz skupine CVD ili PVD [1].

Nakon difuzijske obrade stvaranja karbidnog sloja čelik se može ohlađivati na zraku ili direktno kaliti u odgovarajućem sredstvu za gašenje (voda, ulje, otopina različitih polimera, topla kupka), ovisno o kemijskom sastavu čelika. Ako nije moguće provesti direktno kaljenje, naknadno kaljenje je tada potrebno provesti u zaštitnoj atmosferi ili vakuumu [1]. Postupak difuzijskog stvaranja karbidnih slojeva može se primijeniti kod dijelova kod kojih se ne zahtijevaju uske tolerancije dimenzija ($\pm 10 \mu\text{m}$) [1].

2.1.2 Fizikalni model stvaranja karbidnih slojeva

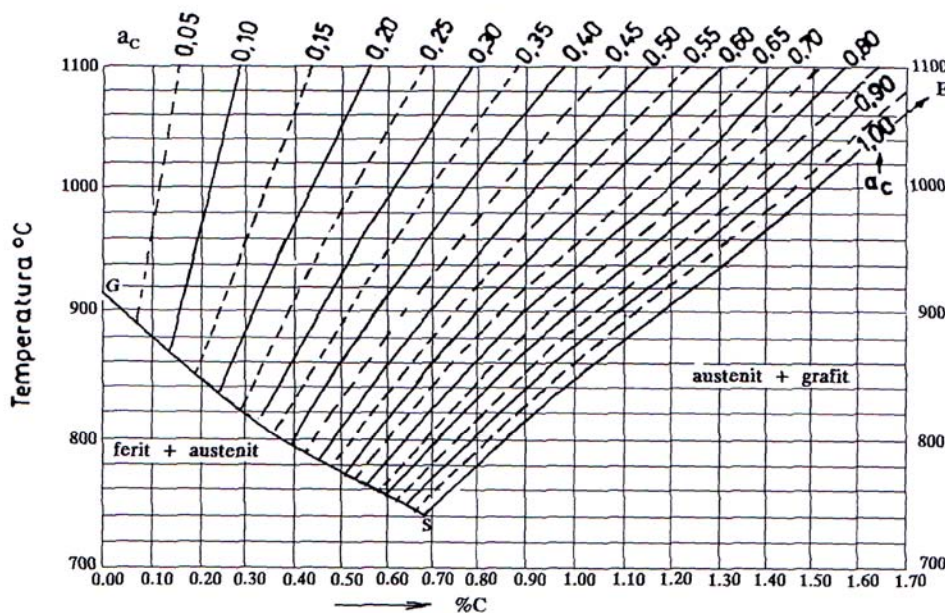
Postupak stvaranja tvrdih karbidnih slojeva na površini čelika provodi se uranjanjem obrađivanog predmeta u rastaljenu kupku odgovarajućeg sastava. Difuzijski procesi koji se odvijaju prilikom stvaranja karbidnog sloja na površini čelika vrlo su složeni. Fizikalni se model stvaranja tvrdog karbidnog sloja na površini obratka može objasniti na primjeru vanadiranja, kada se vanadij u rastaljenu kupku dodaje u metalnom obliku (ferovanadij FeV) ili u obliku oksida (V_2O_5 ili V_2O_3). Proces stvaranja karbidnog sloja na površini čelika odvija se u nekoliko etapa.

- a) Austenitizacija
- b) Difuzija vanadija u površinski sloj čelika; reakcija V i C
- c) Stvaranje karbida V_8C_7 na površini čelika
- d) Rast karbidnog sloja na površini

- a) Austenitizacija

U trenutku uranjanja obratka u rastaljenu kupku na povišenoj temperaturi (900 do 1100°C), kupka ima odgovarajuću termodinamičku aktivnost vanadija a_V , dok obradak ovisno o kemijskom sastavu čelika ima odgovarajuću termodinamičku aktivnost ugljika a_C . Termodinamička aktivnost ugljika u čeliku ovisi o kemijskom sastavu čelika i temperaturi procesa.

Na slici 1 prikazana je ovisnost termodinamičke aktivnosti ugljika o temperaturi i sadržaju ugljika u sustavu Fe-C za područje austenita.



Slika 1. Ovisnost termodinamičke aktivnosti ugljika o temperaturi i sadržaju ugljika u sustavu Fe-C za područje austenita [1]

Kao što je već ranije napomenuto, budući da gotovo svi čelici osim ugljika sadrže i druge elemente, kao što su Si, Mn, Cr, Ni, V, itd. njihov utjecaj na termodinamičku aktivnost treba uzeti u obzir.

b) Difuzija vanadija u površinski sloj čelika

Na temperaturi procesa, austenit može otapati i vanadij do granice rastvorljivosti, vanadij difundira od površine prema unutrašnjosti čelika.

c) Početak stvaranja karbida na površini.

U površinskom sloju austenitiziranog čelika rastvoreni (otopljeni) ugljik u atomarnom stanju (intersticijski mješanac) reagira s vanadijem stvarajući začetak karbidnog sloja na površini čelika. Karbidni sloj nastaje zbog potrebne male slobodne energije za stvaranje karbida i stalne dobave ugljika iz obratka [1].

d) Rast karbidnog sloja na površini

Dalji tijek procesa stvaranja karbidnog sloja odvija se reakcijom između karbidotvornog elementa vanadija iz rastaljene soli i atoma ugljika koji difundiraju iz obratka kroz nastali karbidni sloj. Zbog toga je za rast karbidnog sloja važan sadržaj ugljika koji je otopljen u austenitu na temperaturi procesa. Rast nastalog karbidnog sloja ne odvija se od površine k jezgri obratka, kao kod drugih toplinsko difuzijskih postupaka (pougljičavanje, nitriranje, boriranje,...) već na površini obratka. Potrebni ugljik difuzijom se iz unutrašnjosti obratka pomiče kroz nastajući sloj karbida prema novonastaloj graničnoj površini. Brzinu rasta karbidnog sloja kontrolira brzina difuzije ugljika kroz nastajući karbidni sloj. Budući da se sadržaj ugljika iz austenita smanjuje zbog stvaranja vanadijevog karbidnog sloja, njegova je koncentracija ispod sloja niža od koncentracije u jezgri obratka, tj. dolazi do osiromašenja ugljikom. Porast debljine sloja pri većini difuzijskih procesa razmjeran je kvadratnom korijenu trajanja procesa i može se izraziti jednadžbom:

$$d^2 = k t$$

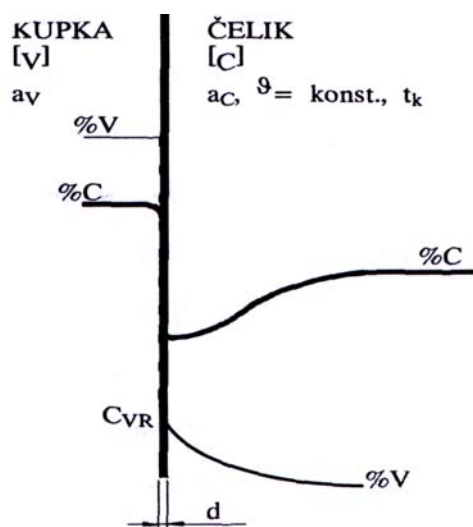
gdje je:

d - debljina sloja [m]

k - konstanta brzine rasta sloja [m²/s]

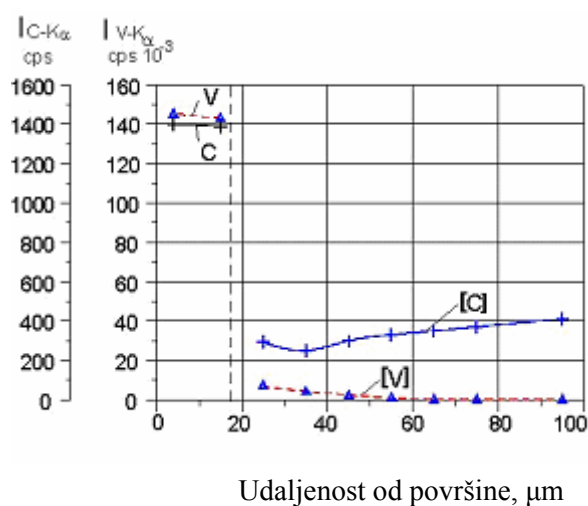
t - trajanje procesa [s]

Iz gore navedenoga je vidljivo da čelik u procesu difuzijskog stvaranja karbidnih slojeva gubi ugljik na površini, koji se troši za stvaranje karbidnih spojeva. Zbog toga se prije provođenja difuzijskog postupka nastajanja karbida površina čelika obogaćuje ugljikom, da bi čelik prilikom difuzijskog nastajanja karbidnih slojeva mogao «crpiti» ugljik iz tog, ugljikom obogaćenog, sloja čelika.



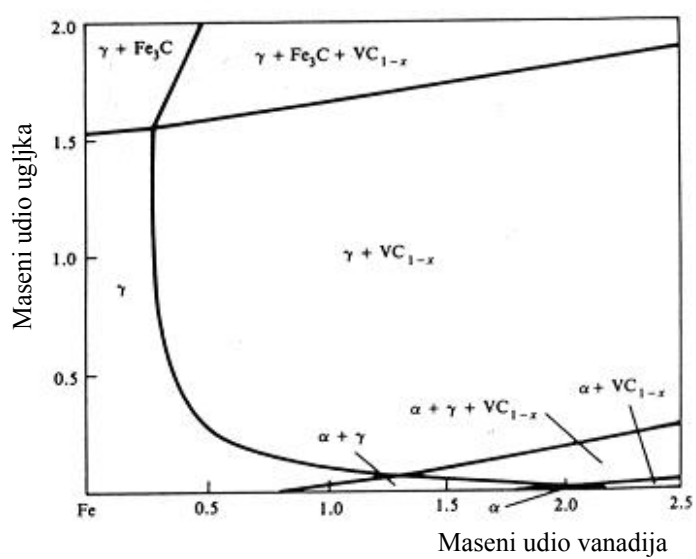
Slika 2. Prikaz stanja nakon završenog procesa stvaranja karbida [1]

Ako se prije stvaranja karbida u čelik ne unese dodatni ugljik, doći će do površinskog razugljičenja radi utroška ugljika za stvaranje karbida. Razugljičenje je nepovoljna pojava jer se uslijed njega smanjuje tvrdoća materijala, savojna čvrstoća, kontaktna čvrstoća, pogoršavaju se otpornost prema trošenju i udarna svojstva. Razugljičenje je prikazano na slici 3. Stoga prije stvaranja karbida čelik treba prethodno pougljičiti.



Slika 3. Kvalitativna mikroanaliza presjeka karbidnog sloja i djelomično razugljičene zone čelika [2]

Rastvorljivost u sustavu C-Fe-V pri temperaturi od 1000 °C prikazana je na slici 4.



Slika 4. Rastvorljivost u sustavu C-Fe-V pri 1000 °C [3]

2.2 Cementiranje

Cementiranje čelika provodi se u nekoliko faza; sastoji se od pugljičavanja površinskog sloja i naknadnog kaljenja te niskotemperaturnog popuštanja. Primjenjuje se za površinsku toplinsku obradu konstrukcijskih dijelova kod kojih se zahtijeva visoka tvrdoća na površini, a istovremeno jezgra mora zadržati visoku žilavost što doprinosi visokoj otpornosti prema udarnim naprezanjima (zupčanici, vratila, osovine i slično). Tako se ova toplinska obrada primjenjuje kod strojnih dijelova koji su izloženi površinskom trošenju i visokim dinamičkim naprezanjima. Ovim se postupkom obrađuju čelici za cementiranje koji sadrže manje od 0,25 % ugljika. U prvom dijelu ovoga postupka, pougljičavanju, u površinskom se sloju poveća sadržaj ugljika tako da se nakon kaljenja postigne visoka tvrdoća. Nepougličeni dio (jezgra) strojnog dijela, radi nižeg sadržaja ugljika, kaljenjem dobiva znatno nižu tvrdoću. Sadržaj ugljika na samoj površini kreće se obično u granicama od 0,8 do 1,0, a prema jezgri ravnomjerno opada. Ovisno o uvjetima pougljičavanja postiže se odgovarajuća dubina pougljičavanja. Naknadnim se kaljenjem u površinskom sloju postiže martenzitna struktura karakterizirana visokom tvrdoćom i otpornošću prema trošenju [4].

2.2.1 Usporedba s ostalim postupcima otvrdnjavanja površine

Primjerice, kod indukcijskog kaljenja zupčanika preferira se tvrdoća od oko 55 HRC na površini i oko 30 HRC u jezgri. Uslijed vrijednosti tvrdoće na površini koje su niže od vrijednosti tvrdoća koje se dobivaju kod cementiranja, tako obrađeni dijelovi nemaju tako dobru kontaktnu čvrstoću ili otpornost na trošenje kao cementirani dijelovi. Indukcijsko je kaljenje primjenjivo kod većih obradaka čiju površinu treba otvrdnuti, a koji bi se kod cementiranja deformirali ili jako promijenili dimenzije.

Nitriranje je postupak kojim se stvara tvrda površina s viskom površinskim tlačnim zaostalim naprezanjima. To je niskotemperaturni postupak pri kojemu ne dolazi do promjena dimenzija obradaka. Stupanj otvrdnuća je uglavnom povezan uz udio kroma u čeliku, tako da se kod ugljičnih čelika ovim postupkom tek neznatno povišuje tvrdoća. Slojevi koji se nitriranjem mogu dobiti su plitki (efektivne dubine od 0,3 do 0,6 mm), čak i kod dugih vremena obrade. Plitkoća sloja ograničava područje uporabe nitriranih čelika. Kod zupčanika, granična veličina zuba (modul) za primjenu postupka nitriranja iznosi oko 2 mm. Stoga, iako ovaj postupak u

području svoje primjene daje dobra svojstva, ne može se koristiti za one namjene za koje je cementiranje uvriježeno.

Kod cementiranja, slojevi mogu biti duboki (čak i više od 4 mm), pri čemu se mogu postići vrijednosti površinske tvrdoće oko 60 HRC. Kontaktni umor površine i savojna čvrstoća su više nego kod indukcijski kaljenih i nitiranih površina. Nepovoljne su strane ovoga postupka nastajanje deformacija i promjena dimenzija uslijed promjene mikrostrukture u površinskom sloju i u jezgri. Deformacije se kod provođenja postupka u određenoj mjeri mogu kontrolirati upotrebom prikladnih naprava i stezaljki, a obradak se nakon kaljenja brusi radi postizanja konačnih dimenzija. Vezano uz slučajeve kod kojih se postavljaju zahtjevi na što manje deformacije, značajan je napredak postignut primjenom postrojenja za cementiranje kod kojih se gašenje obavlja u plinu, a ne u vodi ili ulju kako se kod cementiranja kali većina čelika [4].

2.2.2 Pougličavanje

Pougličavanje je postalo procesom za koji postoji tako veliki broj varijabli da je teško naći dvije firme koje postupak provode na posve isti način. Postoje razlike u odabiru čelika, opremi, tehnici, a uslijed toga nastaju i razlike u kvaliteti obradaka. Ponajviše razlika u mišljenjima nastaje uslijed širokog spektra čelika koji se u ovu svrhu mogu koristiti, širokog raspona obradaka koji se mogu pougličavati ali i uslijed koncepata za vođenje procesa.

Zajedničko je svim postupcima pougličavanja da je ciljani rezultat postupka stvaranje sloja bogatog ugljikom na površini obratka koji nakon kaljenja otvrdnjava. Međutim, samo tvrdoća nije ujedno i pokazatelj zadovoljavajuće kvalitete cementiranog sloja. Utjecaj na kvalitetu imaju i mikrostrukturna svojstva koja značajno utječu na ukupna svojstva obratka i time na životni vijek dijelova.

Mikrostrukturna svojstva koja utječu na svojstva obratka su: unutarnja oksidacija, razuglič enje, slobodni karbidi, zaostali austenit i mikropukotine u martenzitu.

Dalje promjene u mikrostrukтури martenzita događaju se uslijed popuštanja, a na udio austenita i martenzita može se utjecati obradom pohtlađivanja nakon kaljenja.

Ne smije se zanemariti utjecaj mikrostruktura i svojstava jezgre te utjecaj strukture materijala: mikrosegregacija, metalurške čistoće čelika i veličine zrna.

2.2.2.1 Pregled postupaka pougljičavanja

Faza pougljičavanja može se odvijati u krutim (granulati), tekućim (cijanidne soli) i plinovitim sredstvima. Pougljičavanje u krutim sredstvima danas se rijetko nalazi u industrijskoj primjeni, prvenstveno zbog slabih mogućnosti procesne kontrole, a i ekološke neprihvatljivosti.

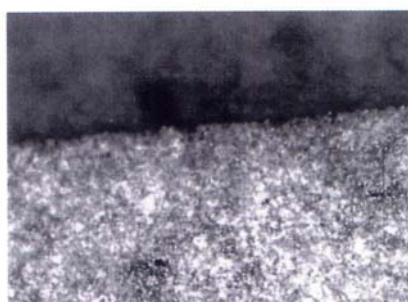
Najčešći danas primjenjivani postupak pougljičavanja jest plinsko pougljičavanje. Vrste plinskih atmosfera su: atmosfere na osnovi plina "nosača" (endo-plin na bazi metana i propana), atmosfere dobivene ukapljivanjem ugljikovodika (najčešće se upotrebljavaju izopropanol, aceton i druge smjese), plinske atmosfere proizvedene direktno u peći (najčešće su sljedeće kombinacije plinova: dušik N_2 -propan C_3H_8 ; ugljični dioksid CO_2 -propan C_3H_8 ; zrak-propan C_3H_8 ; amonijak NH_3 - propan C_3H_8 -zrak i sl.), a u novije vrijeme, postupci u C_2H_2 u vakuumskim pećima te pougljičavanje u ioniziranim plinskim atmosferama (plazma pougljičavanje). Mogućnosti regulacije C-potencijala su dobre, počivaju na kontroli kisikovom sondom i kontroli temperature rođenja. Bitna je komparativna prednost ovoga procesa u tome što ujedinjava pozitivne strane više postupaka (prihvatljivu kvalitetu dobivenih slojeva, prihvatljivu cijenu provođenja postupka i potrebne opreme).

Nakon uvođenja tehnologije plinskog pougljičavanja, u industrijsku su praksu uvedeni postupci kojima se dobivaju izuzetno dobra svojstva površinskog sloja, a također se dobivaju dobri rezultati u postizanju debljine pougljičenog sloja u plitkim i uskim provrtima. Primjerice, razvijeni su niskotlačni postupci pougljičavanja, kod kojih je koeficijent prijenosa ugljika vrlo visok, vremena obrade su kratka, deformacije male, homogenost kod pougljičavanja izvrsna (i u slijepim rupama), gustoća šarže je dobra. Postupak ne proizvodi tvari štetne za okolinu.

Slike 5 i 6 pružaju usporedbu dvaju površinskih slojeva, od kojih je sloj na slici 5 dobiven konvencionalnim postupkom pougljičavanja, a sloj na slici 6 plazma postupkom pougljičavanja.



Slika 5. Mikrosnimka presjeka površine konvencionalno (plinski) pougljičenog sloja [5]



Slika 6. Mikrosnimka presjeka površine pougljičene plazma postupkom [5]

Iz gornjih se slika može zaključiti da je kod plinskog pougljičavanja brušenje površine u većini slučajeva potrebno, jer su mikropukotine na površini generatori naprezanja te tijekom rada dijela može doći do njihova produbljivanja, a nakon toga i do loma dijela.

U okviru navedenih postupaka gašenje se obavlja u inertnom plinu, čime se izbjegava najveći dio deformacija koje se događaju kod konvencionalnih plinskih postupaka, kod kojih se kaljenje obavlja u ulju ili u vodi. Zbog želje da se izbjegnu deformacije razvijaju se i novi materijali za pougljičavanje koji su prikladni za gašenje u plinu.

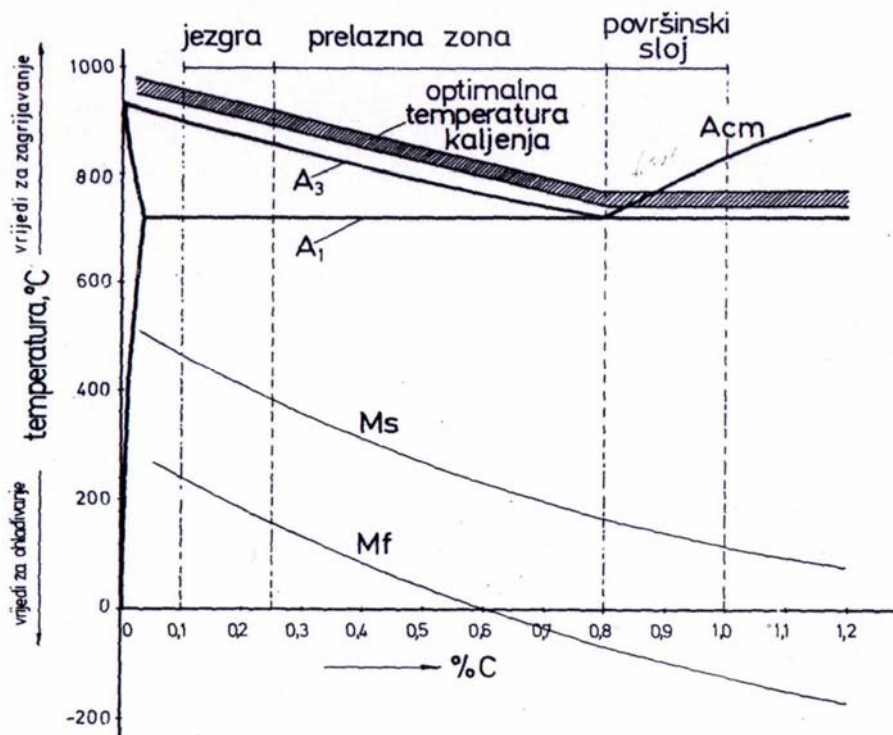
Nedostatak najsuvremenijih postupaka pougljičavanja jest visoka cijena opreme, tako da je primjena tih postupaka opravdana samo kod vrlo specifičnih i najviših zahtjeva, kao i kod velikih serija obradaka gdje bi cijena naknadne mehaničke obrade u cilju uklanjanja deformacija i površinskog sloja (u kojemu se nalaze površinski nedostaci) bila visoka.

2.2.3 Naknadna toplinska obrada pougljičenih čelika

2.2.3.1 Kaljenje

Nakon pougljičavanja u okviru procesa cementiranja provodi se kaljenje čiji je cilj postizanje martenzitne strukture i visoke tvrdoće površinskog sloja. U praksi se primjenjuje više načina provođenja toplinske obrade nakon pougljičavanja ovisno o specifičnim zahtjevima i uvjetima. Na izbor utječu najprije osnovni zahtjevi na strukturna i mehanička svojstva (čvrstoća, žilavost, dinamička izdržljivost, otpornost prema trošenju,...), a zatim svojstva primijenjenog čelika (nelegirani ili legirani čelik, finoizrnuti ili gruboizrnuti čelik, osjetljivost na nastajanje zaostalog austenita). Izbor postupka je također uvjetovan i vrstom raspoložive opreme za toplinsku obradu i drugim proizvodnim uvjetima.

Toplinska obrada nakon pougljičavanja nije jednostavna radi toga što se u pougljičenom sloju ravnomjerno mijenja sadržaj ugljika od površine prema jezgri što ima za posljedicu različiti tok strukturnih promjena u pojedinim dijelovima pougljičenog sloja. Ove se promjene mogu prikazati u dijelu dijagrama Fe-C za metastabilnu kristalizaciju, slika 7 i vrijede za nelegirane čelike. Za legirane su čelike apsolutne vrijednosti odgovarajuće drugačije [6].



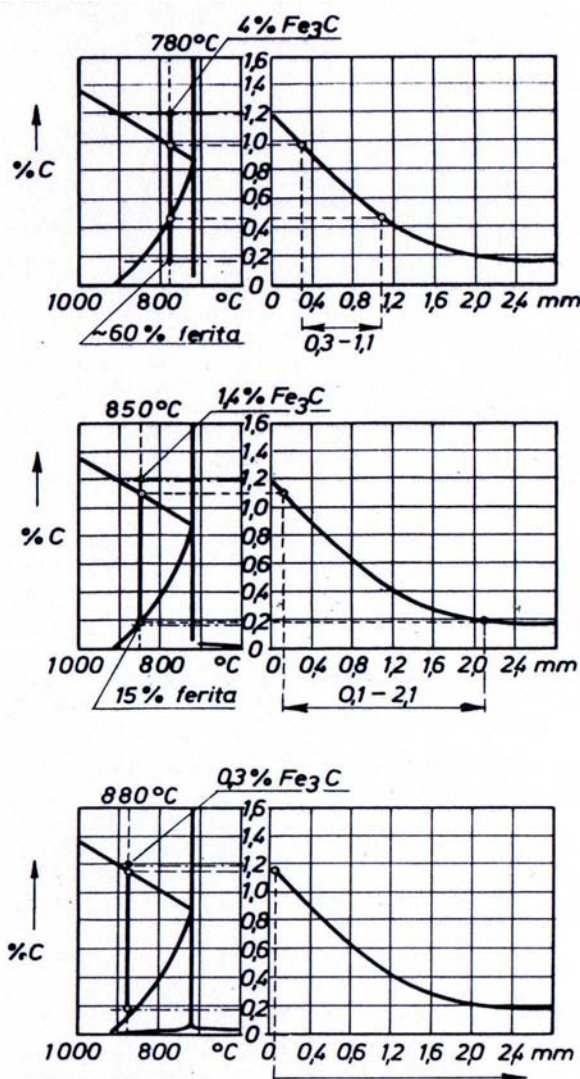
Slika 7. Prikaz stanja u Fe-C dijagramu nakon pougljičavanja [6]

Jezgra je u području podeutektoidnih čelika dok je sam površinski sloj nadeutektoidnog sastava. U prijelaznoj zoni sadržaj ugljika jednoliko opada prema vrijednosti sadržaja jezgre odnosno polaznog sadržaja ugljika u čeliku. Optimalna temperatura kaljenja ovisi o sadržaju ugljika, a iznosi 30-70°C iznad linije A₃, a za nadeutektoidne čelike 50-70°C iznad linije A₁.

Radi toga je nemoguće odabrati jednu temperaturu koja bi bila optimalna za površinski sloj i za jezgru. Razlika temperatura kaljenja za ekstremne slučajeve površine i jezgre iznosi više od 100°C. Ako se pougljičeni čelik kali sa temperature koja je optimalna za kaljenje jezgre, tada će površinski sloj biti «pregrijan», a ako se kali sa temperature koja je optimalna za kaljenje površinskog sloja tada je to preniska temperatura za jezgru jer se pri tome ne može izvršiti potpuna austenitizacija. Prilikom izbora temperature kaljenja mora se ocijeniti da li su prioritetni zahtjevi na svojstva površinskog sloja ili jezgre. To se posebno odražava u slučaju kada je kod pougljičavanja postignut previsok sadržaj ugljika na površini. Ovaj je slučaj prikazan na slici 8 s primjerima kaljenja s tri različite temperature.

Kod austenitiziranja na temperaturi 780°C površinski je sloj djelomično u heterogenom području (austenit+cementit), a prijelazna zona i jezgra su također u heterogenom području (austenit+ferit). Na temperaturi 850°C je manji dio površinskog sloja u području gdje nastupa

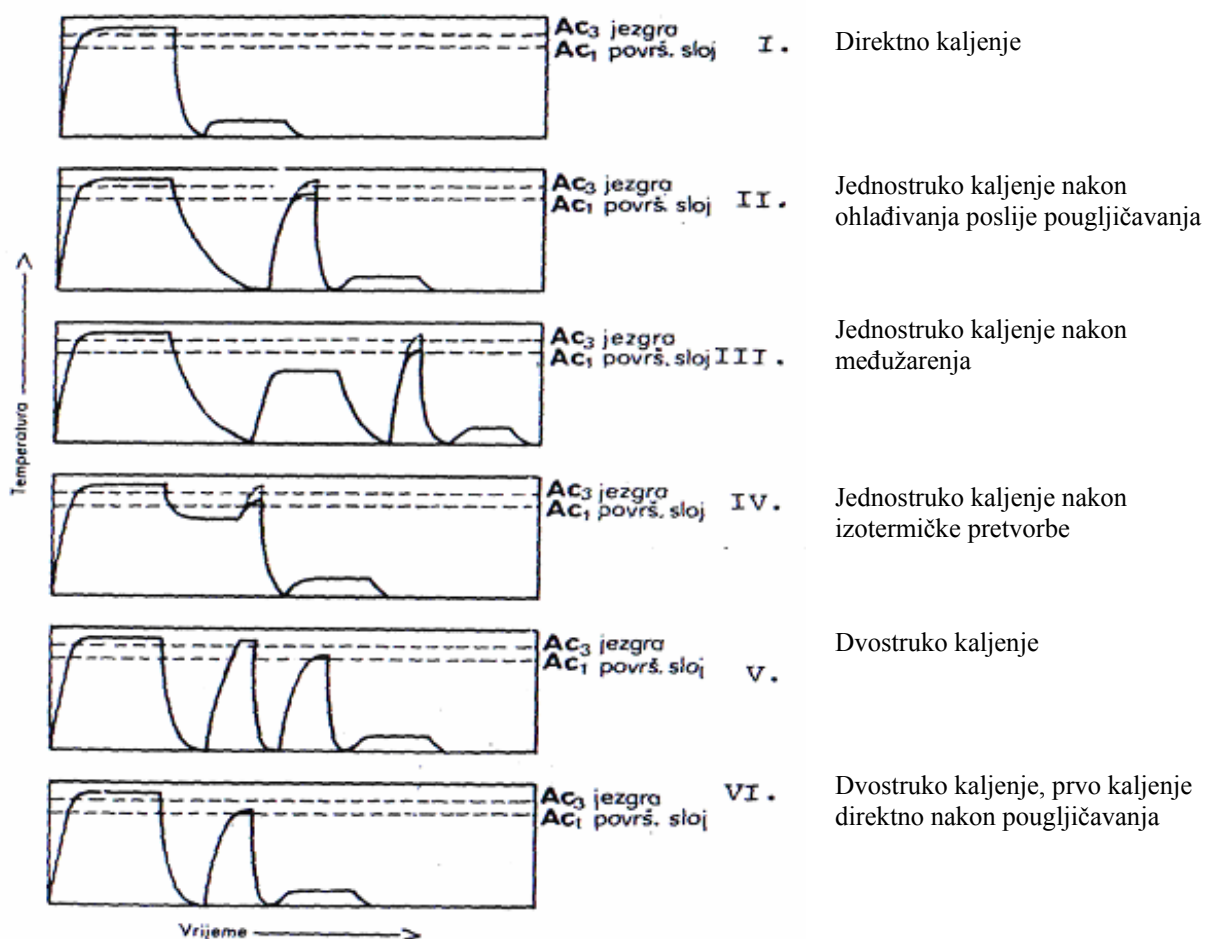
cementit, a i sadržaj cementita na samoj površini je manji. Razlika je također i na drugoj strani tj. u području jezgre koja sadrži 15% ferita na temperaturi austenitizacije. Dalje povišenje temperature austenitizacije ima za posljedicu smanjenje udjela cementita u površinskom sloju na 0,3% dok je jezgra u homogenom području austenita. Za ovaj poseban slučaj najprikladnija bi temperatura kaljenja bila 880°C , jer se praktički eliminira cementit u kaljenom površinskom sloju. Međutim, kada bi površinski sadržaj ugljika iznosio oko 0,8% C, tada bi ova temperatura bila previsoka za kaljenje površinskog sloja budući je znatno iznad A_1 temperature.



Slika 8. Utjecaj temperature austenitizacije na strukturno stanje pougljičenog čelika [6]

Kako i linije M_s i M_f (početak i kraj transformacije martenzita) ovise o sadržaju ugljika, to će se kod kaljenja (gašenja) prvo izvršiti pretvorba strukture u području jezgre (kod viših temperatura), a tek kod nižih temperatura pretvorba austenita u martenzit u površinskom sloju. Ohlađivanjem do sobne temperature u površinskom sloju transformacija se neće izvršiti

u potpunosti pa će u strukturi biti prisutan zaostali austenit. Potpuna transformacija austenita može se postići «dubokim» ohlađivanjem na temperature ispod M_f . Kod legiranih je čelika položaj linija M_s i M_f još i niži nego kod nelegiranih, za koje vrijedi prethodni Fe-C dijagram. U literaturi se navodi, a također u praksi provodi veliki broj različitih postupaka toplinske obrade nakon pougljičavanja. Na slici 9 navedeni su postupci klasificirani po DIN-u s prikazom toka obrade i nazivima postupaka.



Slika 9. Vrste kaljenja nakon pougljičavanja [6]

- I. Direktno kaljenje

Nakon pougljičavanja čelik se direktno kali sa temperature pougljičavanja. Ovaj je postupak najjeftiniji, međutim ima određenih nedostataka u odnosu na ostale postupke. Uslijed dugog držanja na temperaturi pougljičavanja dolazi do pogrubljenja austenitnog zrna što štetno djeluje na žilavost kaljenog čelika. Kod pougljičavanja s višim C-potencijalom, a posebno kod legiranih čelika za cementiranje, u površinskom sloju će biti veća količina zaostalog

austenita. Radi toga se ovaj postupak koristi kod standardnih kvaliteta čelika u slučajevima kada se u pogledu strukture i mehaničkih svojstava ne postavljaju visoki zahtjevi. Budući da je ovaj postupak prikladan za rad u mehaniziranim postrojenjima, on se primjenjuje i u slučajevima kada su postavljeni visoki zahtjevi na strukturna i mehanička svojstva, ali se pri tome koriste «sitnozrnati čelici» kod kojih ne dolazi do bitnog pogrubljenja zrna, a i sklonost zaostalom austenitu je manja.

U praksi se često primjenjuje direktno kaljenje «sa snižene temperature». Nakon pougljičavanja, čelik se ohladi na nižu temperaturu, obično na temperaturu kaljenja jezgre sa koje se provodi kaljenje [6]. Time se smanjuju deformacije koje nastaju kod kaljenja, jer je temperaturna razlika kod kaljenja manja.

- II. Jednostruko kaljenje.

Provodi se sa temperatura koje odgovaraju temperaturama kaljenja za površinski sloj (iznad A_1) ili sa temperatura koje odgovaraju za kaljenje jezgre. Pritom postoji više varijanti postupka, a svima je zajedničko da se između pougljičavanja i kaljenja provede postupak kod kojega dolazi do pretvorbe austenita pa se kod naknadne austenitizacije na temperature iznad A_1 postiže bar djelomična prekrystalizacija koja ima za posljedicu usitnjenje zrna. Kada se nakon pougljičavanja provodi sporo ohlađivanje postoji opasnost stvaranja karbidne mreže po granicama zrna u slučaju da je sadržaj ugljika u površinskom sloju iznad eutektoidne koncentracije. U tom je slučaju preporučljivo brzo ohlađivanje. Kod naknadnih kaljenja treba voditi računa da se na temperaturi kaljenja treba izvršiti rastvaranje karbida. Postupak sa međuzarenjem (III) u starijim je preporukama predlagan s ciljem smanjenja napetosti i deformacija, međutim, praksa je pokazala da se time ne postižu nikakvi efekti budući da naknadno kaljenje ima odlučujući utjecaj na deformacije strojnih dijelova. Uklanjanje karbidne mreže također ne dolazi u obzir budući da je temperatura međuzarenja od 650°C preniska za tu namjenu. Nakon pougljičavanja u solnim kupkama, a također i u plinskim atmosferama, može se primijeniti međuohlađivanje (IV). Ono se provodi tako da se sa temperature pougljičavanja čelik relativno brzo ohladi do temperature oko 600°C (ovisno o vrsti čelika), zatim odgovarajuće vrijeme drži na toj temperaturi, pri čemu se izvrši pretvorba austenita u perlitnom stupnju. Držanje na ovoj temperaturi ovisi također o vrsti čelika, a može se očitati iz pripadajućeg TTT-dijagrama za izotermičku transformaciju. Nakon ovoga slijedi ugrijavanje na temperaturu kaljenja površinskog sloja (iznad A_1) ili za kaljenje jezgre

(iznad A_3). Ovaj postupak ima prednosti kako u pogledu manjeg utroška toplinske energije tako i u pogledu skraćanja ukupnog ciklusa toplinske obrade.

Ako između pougljičavanja i kaljenja treba provesti mehaničku obradu, ista se može provesti nakon međuzarenja ili se nakon međuohlađivanja može izvršiti konačno ohlađivanje. Mehanička obrada nakon ohlađivanja sa temperatura pougljičavanja na zraku može biti otežana budući da kod dijelova koji se brzo hlade, a posebno ako su izrađeni od legiranih čelika za cementiranje, u strukturi mogu nastati bainit, sorbit, a često i martenzit.

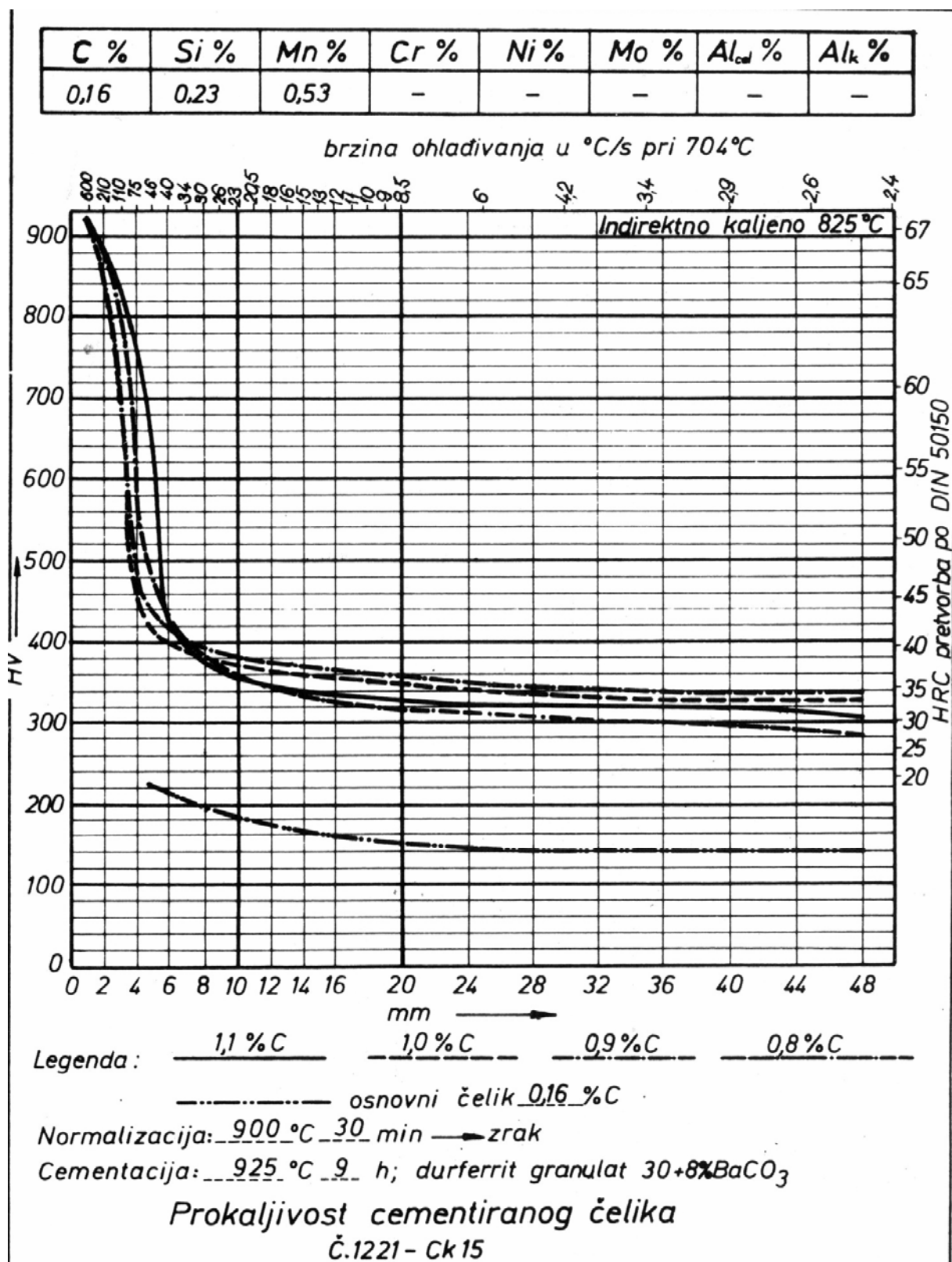
- IV. Dvostruko kaljenje

Ovaj se postupak ranije preporučivao za slučajeve kada se zahtijeva najviša površinska tvrdoća i najbolja žilavost jezgre. Međutim, praksa je pokazala da to nije lako ostvarivo. Visoka žilavost koja se postiže prvim kaljenjem sa temperature koja odgovara optimalnoj temperaturi za kaljenje jezgre, bitno se smanji drugim kaljenjem s niže temperature. Ovo se drugo kaljenje provodi sa temperature koja je preniska za kaljenje jezgre. Na tim je temperaturama izvršena samo djelomična prekrystalizacija osnovne strukture jezgre, tako da je na toj temperaturi u strukturi, pored austenita, prisutan i ferit. Kaljenjem se tako postigne heterogena struktura pa je i žilavost umanjena. Radi toga primjena ovog postupka nema jakog opravdanja. Osim što se ne postižu željena svojstva, ovdje je i veća mogućnost grešaka kod kaljenja uslijed većeg broja ciklusa ugrijavanja i hlađenja. Poseban slučaj dvostrukog kaljenja je slučaj kada se prvo kaljenje provede direktno sa temperature pougljičavanja, a drugo kaljenje sa temperature koja odgovara za površinski sloj.

Jednostruko i dvostruko kaljenje povećava troškove obrade i protok proizvodnje, zato se sve više nastoji primijeniti direktno kaljenje. Nedostaci ovoga jeftinijeg postupka (pogrubljenje zrna, veći udio zaostalog austenita) ublažavaju se primjenom tzv. sitnozrnatih čelika za direktno kaljenje i primjenom pougljičavanja s kontinuiranim podešavanjem potencijala ugljika i optimiranjem koncentracije ugljika u pougljičenom sloju. To omogućuju nove metode kontroliranja i reguliranja C-potencijala primjenom matematičkog modela cjelovitog postupka pougljičavanja.

Za sve postupke kaljenja može se primjenjivati hlađenje u vodi, ulju ili toploj kupki ovisno o vrsti čelika i dimenzijama dijelova. Sredstvo gašenja odnosno potrebni intenzitet ohlađivanja može se odrediti na temelju tzv. rubne kaljivosti čelika za cementiranje, slika 9. Svi čelici za cementiranje imaju za određene sadržaje ugljika u pougljičenom sloju utvrđene Jominy krivulje pomoću kojih se uz korištenje prikladnih dijagrama mogu

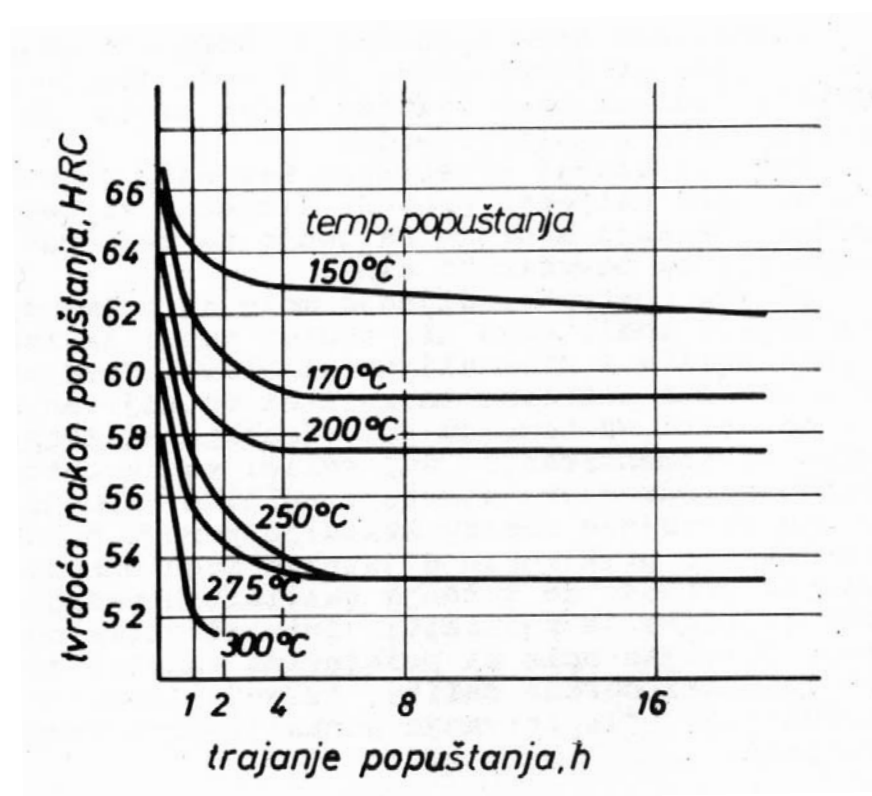
odrediti površinske tvrdoće za gašenje različitih promjera strojnih dijelova sa različitim intenzitetima ohlađivanja [6].



Slika 10. Dijagram rubne kaljivosti čelika Č1221 [7]

2.2.3.2 Popuštanje

Prilikom kaljenja u pougljičenom sloju nastaje tetragonalni martenzit. Uslijed visokih napetosti u cementiranom čeliku postoji opasnost nastanka grešaka, pa se nakon kaljenja obvezno provodi niskotemperaturno popuštanje. Pri tome dolazi do pretvorbe u kubični martenzit, a posljedica je mali pad tvrdoće. Proces popuštanja zavisi o temperaturi i trajanju popuštanja, kao što je prikazano na slici 11. Čelici za cementiranje popuštaju se obično na temperaturama 150 do 200 °C nakon čega je površinska tvrdoća 58 do 62 HRC. Temperature više od 200 °C s obično ne primjenjuju jer se smanjuje dinamička izdržljivost uslijed pojave krhkosti kod nekih vrsta čelika [6].

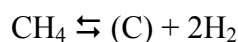
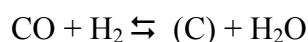
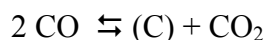


Slika 11. Pad tvrdoće u ovisnosti o temperaturi i trajanju popuštanja [6]

2.3 Pougličavanje u plinskim atmosferama

2.3.1 Osnove procesa i kontrole atmosfere

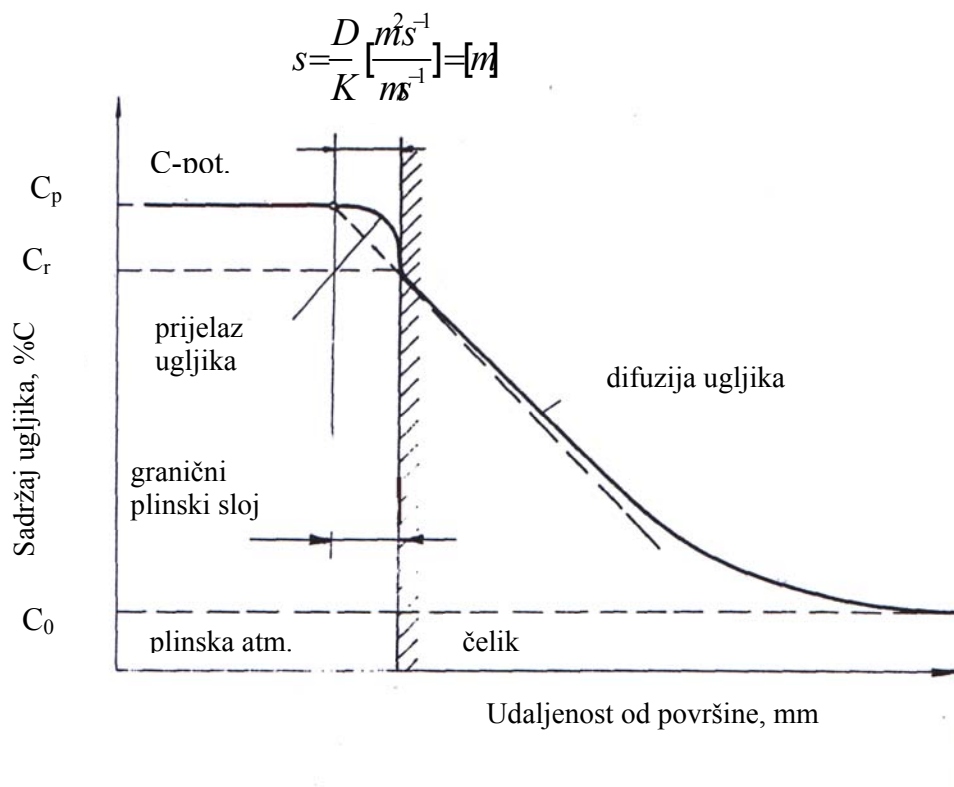
Pougličavanje u plinskim atmosferama provodi se kod visokih temperatura (obično od 880 do 950°C, jer je pri tim temperaturama rastvorljivost ugljika visoka. Na tim temperaturama čelik ima mogućnost postizanja visokog sadržaja ugljika na površini i potrebne dubine pougličavanja. Čelik za cementiranje u kontaktu je sa sredstvom za pougličavanje koje je karakterizirano «potencijalom ugljika» (C-potencijal) [8]. Taj «potencijal ugljika» odgovara ravnotežnoj koncentraciji ugljika (%C) za sljedeće reakcije koje se mogu odvijati pri pougličavanju:



Budući da je C-potencijal (C_p) viši od koncentracije ugljika u čeliku, odvija se proces prijenosa ugljika iz plinske atmosfere u površinske slojeve čelika. Taj dio procesa sastoji se od sljedećih koraka: difuzije plinskih komponenata kroz granični plinski sloj, adsorpcije plinskih komponenata na površinu čelika, reakcije na površini čelika i desorpcije plinskih produkata. Mehanizam reakcija na površini čelika nije još pouzdano utvrđen. Također je nemoguće «blokiranje» stanja radi provođenja pouzdanih analiza pri sobnim temperaturama. Nepoznavanje tog koraka prijenosa ugljika ostaje i dalje aktualno za fundamentalna tumačenja prelaska ugljika iz plinovitog agregatnog stanja (o obliku CO i CH₄) u kruto agregatno stanje (ioniziran atom ugljika u intersticijskom kristalu mješanca austenita). Međutim, za definiranje cijele etape prijenosa ugljika primjenjuje se koeficijent K , koji obuhvaća sve navedene korake ove etape procesa. Koeficijent prijenosa ugljika određuje se metodom folija i u literaturi postoje rezultati utjecaja sastava plinske atmosfere i sastava čelika na veličinu koeficijenta K [8].

Kako se danas daleko najviše upotrebljavaju postupci plinskog pougličavanja, u radu se posebna pažnja posvećuje kinetici toga procesa.

Glavne su karakteristike faza pougljičavanja prikazane na slici 12.



Slika 12. Prikaz procesa pougljičavanja čelika [8]

U graničnom sloju reaktanti difundiraju do granične ravnine, a produkti reakcija pougljičavanja difundiraju u suprotnom smjeru. Radi toga C-potencijal opada u graničnom sloju koji ima širinu «s». Na samoj graničnoj ravnini odvijaju se kemijske reakcije pougljičavanja pri čemu se na površini čelika povisuje sadržaj ugljika. Ova faza procesa naziva se «prijelaz ugljika». Budući da čelik na temperaturama pougljičavanja ima austenitnu strukturu (plošno centrirana kubična rešetka) ugljika zauzima intersticijski (uključinski) položaj u osnovnoj rešetki austenita. Kako je C-potencijal sredstva za pougljičavanje viši od sadržaja ugljika u čeliku za cementiranje (C_0 , odgovara također sadržaju ugljika u jezgri nakon pougljičavanja), sadržaj ugljika na površini se povećava i u određenoj fazi postupka ima vrijednost C_r (sadržaj ugljika na površini). Povećani sadržaj ugljika na površini u odnosu na sadržaj ugljika u jezgri (gradijent ugljika) ima za posljedicu difuziju ugljika od površine prema jezgri. Sveukupni postupak pougljičavanja može se objasniti pomoću modificiranog oblika transportne jednačbe prema kojoj je masa ugljika M koja prođe kroz površinu F u vremenu dt jednaka prijelazu ugljika iz sredstva za pougljičavanje na površinu čelika, a također i sljedećoj fazi postupka, difuziji ugljika u čeliku:

$$M / F dt = K (C_p - C_r) = D_c (\partial C / \partial t) \quad (1)$$

M - masa ugljika [kg]

F - površina [m²]

K - koeficijent prijelaza ugljika [m/s]

D - koeficijent difuzije ugljika u čeliku [m²/s]

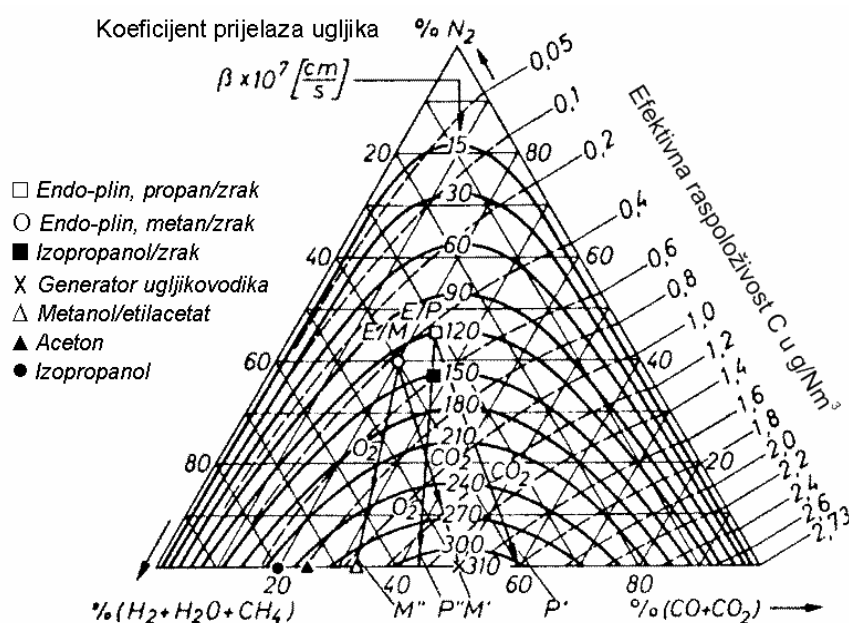
C_p - C-potencijal [% C]

C_r - sadržaj ugljika na rubu [% C]

t - vrijeme pougljičavanja [s]

U ovoj transportnoj jednadžbi, K obuhvaća prijelaz ugljika iz sredstva za pougljičavanje i kemijske reakcije pougljičavanja na graničnoj ravni. Ovaj koeficijent se određuje eksperimentalno, a u literaturi se navodi više metoda određivanja. Na vrijednost koeficijenta K tj. na prijelaz ugljika utječu sljedeći faktori, slika 13:

- vrsta i stanje (sastav) sredstva za pougljičavanje
- potencijal ugljika
- temperatura pougljičavanja
- vrsta čelika (utjecaj legirajućih elemenata)



Slika 13. Prikaz koeficijenta difuzije, β (K) u sustavu (CO+CO₂) - (H₂+H₂O+CH₄) - N₂, kod 900 °C [9]

Koeficijent difuzije ugljika u čeliku, D , također se određuje eksperimentalno, a ovisi o:

- temperaturi
- vrsti čelika (kemijskom sastavu)
- sadržaju ugljika

Presjecište ekstrapolirane krivulje sadržaja ugljika u pougljičenom sloju (krivulja pougljičavanja) i linije C-potencijala daje vrijednost «s», širinu graničnog sloja u kojem se provodi prijelaz ugljika. Ona ovisi o koeficijentu prijelaza ugljika K , a također i o koeficijentu difuzije ugljika D . Sveukupni proces pougljičavanja tako zavisi o sredstvu za pougljičavanje, temperaturi i trajanju pougljičavanja te o vrsti čelika.

Vremenska raspodjela ugljika u pougljičenom sloju definirana je jednadžbom drugog Fickovog zakona:

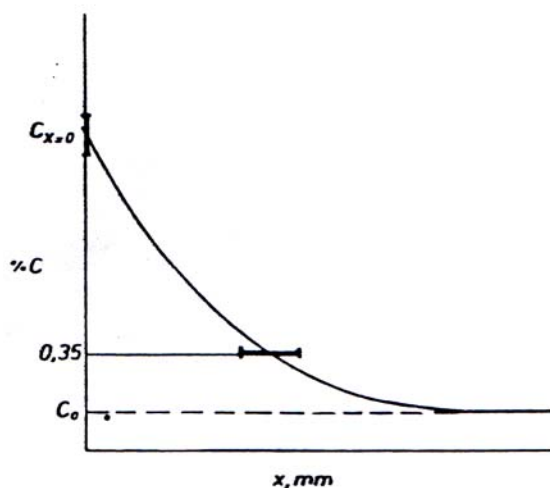
$$\partial C / \partial t = D \partial^2 C / \partial x^2 \quad (2)$$

gdje je: C - koncentracija ugljika [% C]
 t - vrijeme pougljičavanja [s]
 x - udaljenost od površine [m]
 D - koeficijent difuzije ugljika [m^2s^{-1}]

Po izvornom principu Fickovih zakona koji pretpostavljaju da je pokretačka sila difuzije gradijent koncentracije, u literaturi postoji veliki broj podataka o utjecaju temperature, sadržaja ugljika i legirajućih elemenata na koeficijent difuzije ugljika u austenitu. Rezultati se, međutim, znatno razlikuju. Pritom je značajno da postoji funkcionalna zavisnost koeficijenta D o koncentraciji ugljika. Radi toga jednadžba drugog Fickovog zakona ima oblik:

$$\partial C / \partial t = \partial / \partial x (D (\partial C / \partial x)) \quad (3)$$

Kod pougljičavanja čelika postavljaju se (ovisno o naprezanjima kojima će strojni dijelovi biti izloženi u eksploataciji) sljedeći osnovni zahtjevi (slika 14):



Slika 14. Shematski prikaz vrijednosti koje se zahtijevaju kod pougljičavanja čelika [8]

- a) Sadržaj ugljika na površini čelika u zadanim granicama. Nakon kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja postiže se zahtijevana površinska tvrdoća i mikrostruktura površinskog sloja.
- b) Efektivna dubina pougljičavanja (također u zadanim granicama). To je dubina na kojoj je sadržaj ugljika 0,35%C i gdje se naknadnim kaljenjem postiže tvrdoća 550 HV1. Po DIN 50190 to odgovara tzv. efektivnoj dubini cementiranja.

To znači da nakon izvršenog pougljičavanja krivulja pougljičavanja treba prolaziti kroz zadano područje. Kako na tok procesa utječe veliki broj utjecajnih faktora, često u praksi nije lako ispuniti postavljene zahtjeve. Pri projektiranju tehnologije pougljičavanja koriste se zato matematički modeli koji obuhvaćaju utjecaj pojedinih parametara, a mogu se podijeliti na empirijske i teorijske.

2.3.1.1 Empirijski modeli

Koriste se već niz godina, od kada se primjenjuje tehnologija pougljičavanja u kontroliranim plinskim atmosferama. Na temelju prethodno izvršenih eksperimenata utvrde se zavisnosti trajanja pougljičavanja i efektivne dubine, uz zadovoljenje postavljenog zahtjeva na sadržaj ugljika u površinskim slojevima ugljika. Zavisnosti su eksponencijalne i vrijede za određene parametre procesa:

- vrstu plinske atmosfere

- C - potencijal plinske atmosfere
- temperaturu pougljičavanja
- sastav čelika
- trajanje pougljičavanja

Na taj je način svaki empirijski model ograničen samo na usko područje valjanosti. To praktički znači da je za svaku vrstu čelika (ugljični i brojni legirani čelici za cementiranje), nužno eksperimentalno utvrditi zavisnosti pougljičavanja u različitim plinskim atmosferama (u industrijskoj ih primjeni ima mnogo) pri konstantnim C - potencijalima i temperaturama pougljičavanja [8].

2.3.1.2 Teorijski modeli

Radi ograničenih mogućnosti primjene empirijskih modela razvijeni su teorijski modeli kojima se matematički opisuje proces pougljičavanja. Budući da obuhvaćaju sve parametre procesa moguća je primjena za sve uvjete pougljičavanja. Radi složenih matematičkih odnosa, teorijski su modeli u početku najčešće sadržavali određena pojednostavljenja. Razvojem računalne obrade omogućeno je izračunavanje i sa složenim matematičkim modelima, a u području pougljičavanja razvijen je matematički model koji uzima u obzir sve utjecajne parametre. Osnovne značajke tog modela su sljedeće: model preuzima drugi Fickov zakon vremenske raspodjele ugljika u pougljičenom sloju, a koji je moguće riješiti samo uz zadane rubne uvjete. U ovom slučaju, to su:

- a) rubni uvjet na faznoj granici plin - čelik ($x = 0$) proizlazi iz transportne jednačbe:

$$K (C_p - C_{x=0}) = D \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (4)$$

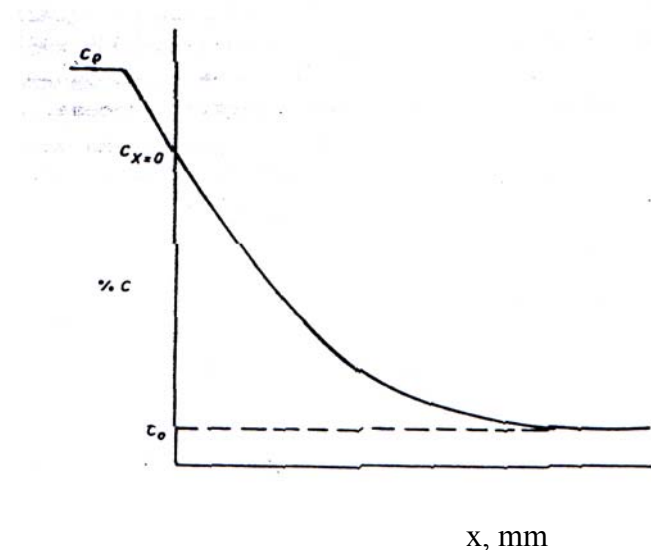
K - koeficijent prijelaza ugljika [m/s]

C_p - C-potencijal atmosfere

$C_{x=0}$ - koncentracija ugljika na faznoj granici

D - koeficijent difuzije ugljika [m^2s^{-1}]

To znači da je masa ugljika koja prolazi kroz plinski granični sloj jednaka masi ugljika koja prolazi kroz površinu čelika. Kako se koncentracija ugljika na faznoj granici, $C_{x=0}$, u toku procesa mijenja, ovaj je rubni uvjet vremenski primjenljiv.



Slika 15. Prikaz toka ugljika kod postupka pougljičavanja [8]

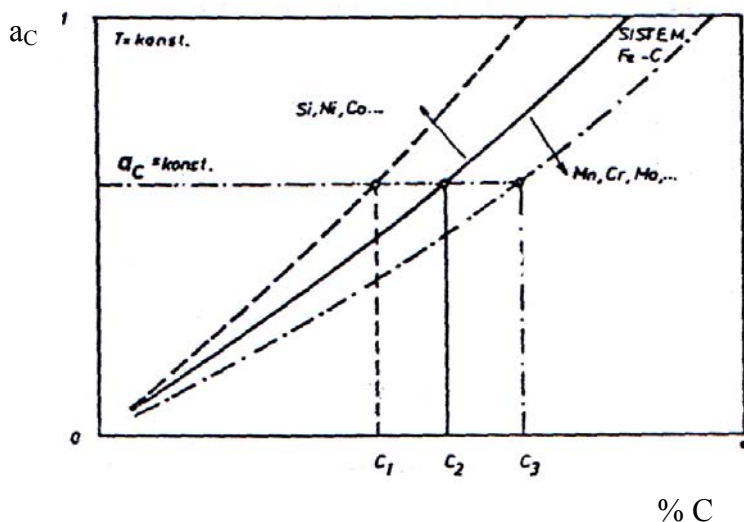
- b) Drugi rubni uvjet jest da se koncentracija ugljika izjednačuje s početnom koncentracijom (C_0) u beskonačnosti, što znači da se proces odvija u polubeskonačnom tijelu [8].

U početku razvoja modela pougljičavanja, oni su se temeljili na zakonitostima gradijenta mase ugljika. To znači da je pokretačka sila sveukupnog procesa bio gradijent koncentracije ugljika. Nakon toga, uveden je novi princip, u kojemu je pokretačka sila procesa bio gradijent kemijskog potencijala ugljika. Identično je polazište dokazano kod nekih drugih metalurških procesa. Kako kemijski potencijal odgovara parcijalnoj Gibbsovoj slobodnoj energiji, to znači da se ovdje umjesto zakonitosti mase primjenjuju zakonitosti energije procesa. Proces pougljičavanja provodi se pri konstantnim temperaturama pa se stoga umjesto kemijskog potencijala ugljika može uvesti termodinamička aktivnost ugljika (a_c) jer je:

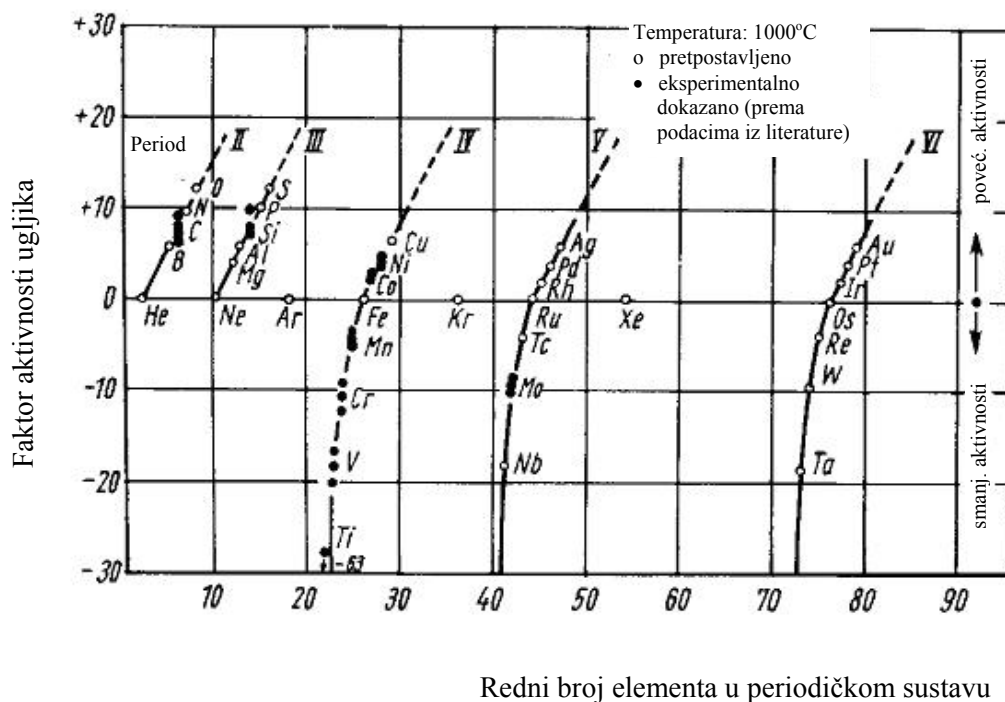
$$\mu_C = R T \ln a_c$$

Uvođenje pojma termodinamičke aktivnosti ugljika ovdje je posebno opravdano, jer austenit nije idealan kruti rastvor tj. aktivnost ugljika nije linearno proporcionalna koncentraciji ugljika. Na slici 16 prikazan je kvalitativni odnos koncentracije i aktivnosti ugljika pri

konstantnoj temperaturi za binarni sistem legura Fe-C (nelegirani čelici). Standardno stanje ($a_C=1$) je grafit, što odgovara granici S'-E' u dijagramu stanja za stabilnu ravnotežu [6]. Utjecaj rednog broja legiranih elemenata u periodičkom sustavu na faktor aktivnosti ugljika prikazan je na slici 17.



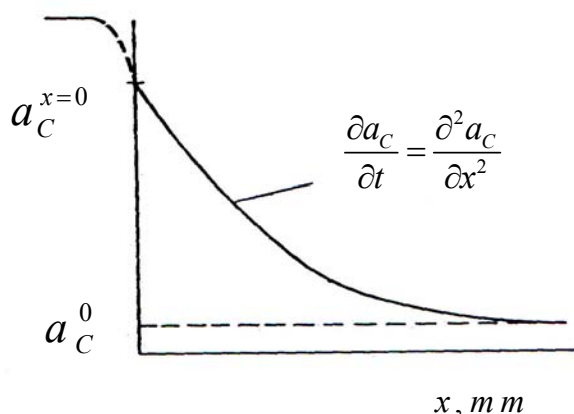
Slika 16. Kvalitativni odnos aktivnosti i koncentracije ugljika u austenitu [8]



Slika 17. Utjecaj rednog broja legiranih elemenata u periodičkom sustavu na faktor aktivnosti ugljika [2]

Većina čelika za cementiranje sadrži legirajuće elemente koji različito utječu na termodinamičku aktivnost ugljika u austenitu. Tako, npr. Si i Ni povećavaju, dok Cr, Mo i Co snizuju aktivnost ugljika u austenitu.

Uzimajući u obzir navedeno polazište, novi se model (shematski prikazan na slici 17) temelji na zakonitostima raspodjele aktivnosti ugljika.



Slika 18. Dijagram uz novi model pougljičavanja čelika [8]

U krutoj fazi - čeliku početna aktivnost ugljika (a_C^0) ovisi o temperaturi, koncentraciji ugljika i koncentraciji legirajućih elemenata. Na drugoj strani, u plinskoj atmosferi aktivnost ugljika određena je parcijalnim tlakovima plinskih komponenata za Boudouardovu ravnotežnu reakciju:

$$a_C^p = p_{CO}^2 / p_{CO_2} K_B$$

$$K_B = 10^{(8920/T - 9,11)} \quad (5)$$

a_C^p - aktivnost ugljika na faznoj granici

p_{CO} - parcijalni tlak CO [Pa]

p_{CO_2} - parcijalni tlak CO₂ [Pa]

T - temperatura [K]

K_B - Boudouard-ova konstanta

Uvođenje veličine termodinamičke aktivnosti ugljika u plinskoj atmosferi, umjesto C - potencijala, ovdje je posebno opravdano, jer u plinskoj atmosferi ugljik ne postoji u elementarnom obliku već je sadržan u vezanom obliku (CO i CO₂). Vremenska raspodjela aktivnosti ugljika u čeliku definirana je modificiranim drugim Fickovim zakonom [6]:

$$\frac{\partial a_c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 a_c}{\partial x^2} \quad (6)$$

D - koeficijent difuzije ugljika [m^2/s]

a_c - aktivnost ugljika

Koeficijent difuzije ugljika (D) vrijedi za gradijente aktivnosti ugljika. Za rješenje ove jednačbe prihvaćeni su analogni rubni uvjeti kao i kod prethodno opisanog modela:

ad a) prvi rubni uvjet odgovara promjeni aktivnosti ugljika na faznoj granici:

$$K_c^a (a_c^p - a_c^{x=0}) = D \left. \frac{\partial a_c}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (7)$$

K_c^a - koeficijent prijelaza ugljika [m/s]

a_c^p - aktivnost ugljika na faznoj granici

$a_c^{x=0}$ - aktivnost ugljika u $x=0$

D - koeficijent difuzije ugljika [m^2/s]

x - udaljenost od površine [m]

ad b) drugi rubni uvjet odgovara procesu koji se odvija u polubeskonačnom tijelu:

$$a_c^{xt} = a_c^0 \quad \text{kod } x = \infty$$

a_c^{xt} - aktivnost ugljika na udaljenosti x u trenutku t

a_c^0 - aktivnost ugljika jezgre

Ako proces slijedi zakonitosti raspodjele aktivnosti ugljika, onda koeficijenti K^a i D_c^a ne ovise o veličini aktivnosti ugljika. To znači da se oni tokom procesa ne mijenjaju. Ovo znatno pojednostavljuje rješenje modela. Analitičko rješenje u eksplicitnom obliku daje raspodjelu aktivnosti ugljika ovisno o svim parametrima:

$$a_c^{xt} = a_c^0 + (a_c^p - a_c^0) \cdot \left[\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} - \exp \frac{K \cdot x + K^2 \cdot t}{D} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} + K \sqrt{\frac{t}{D}} \right) \right] \quad (8)$$

Sljedeći korak jest prevođenje toga rješenja na tok koncentracije ugljika u pougljičenom sloju, jer se upravo te veličine zahtijevaju i kontroliraju nakon pougljičavanja. Pritom se koriste poznate zavisnosti između aktivnosti ugljika i koncentracije, odnosno molnog udjela ugljika (N_C):

$$\log a_C = \frac{2300}{T} - 2,21 + 0,151\%C + \log N_C \quad (9)$$

$$N_C = \frac{\frac{\%C}{12,01}}{\frac{\%C}{12,01} + \frac{100 - \%C}{55,85}} \quad (10)$$

Za legirane čelike u proračunu se koristi i jednadžba utjecaja legiranih elemenata na aktivnost ugljika:

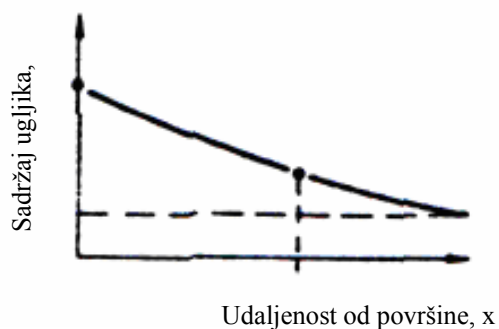
$$\log \left(\frac{a_C^{leg}}{a_C^{Fe-C}} \right)_{a_C} = 0,055\%Si - 0,013\%Mn - 0,04\%Cr + 0,014\%Ni - 0,013\%Mo - 0,102\%V - 0,014\%Al - 0,006\%Cu + 0,22\%N \quad (11)$$

Na taj se način za određene uvjete pougljičavanja može izračunati teorijski tok krivulja pougljičavanja bilokojeg čelika.

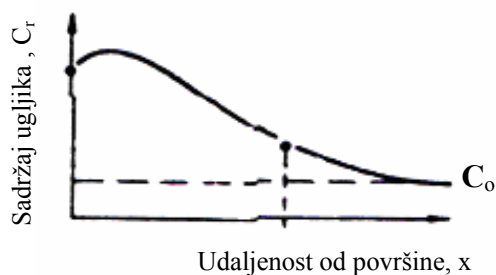
Osim analitičkih metoda (npr. Laplace-ove transformacije), za rješavanje matematičkog modela pougljičavanja koriste se i numeričke metode konačnih elemenata.

2.3.1.2.1 Utjecaj tehnoloških parametara na vođenje procesa pougljičavanja

Kao tražene izlazne vrijednosti kod procesa pougljičavanja koji je dio postupka cementiranja zadaju se efektivna dubina pougljičavanja, Ed_p i sadržaj ugljika na rubu, C_R . Efektivna je dubina pougljičavanja ona dubina na kojoj je sadržaj ugljika $C_{ef} = 0,35\%$. Pod uvjetom da se proces tako vodi da se ne prelazi granica čađe i da se izbjegne stvaranje nepoželjnih karbida, računalo proces može završiti tako da obradak ima profil sadržaja ugljika kao što je prikazano na slici 19a, ali jednako tako može imati i profil sadržaja ugljika prema slici 19b.



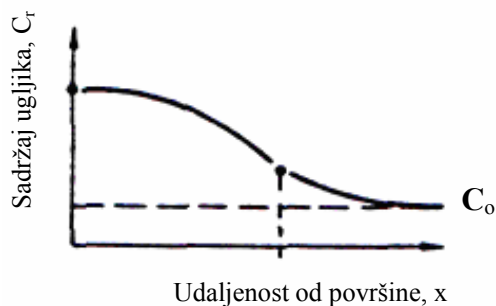
a)



b)

Slika 19. Shematski prikaz nepovoljnih profila toka ugljika dobivenih pougljičavanjem s dva C-potencijala, C_R i C_0 [10]

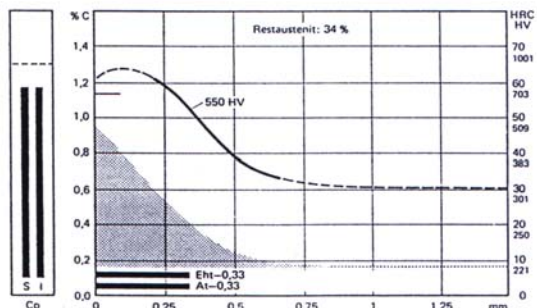
Međutim, gornji profili toka ugljika nisu poželjni i ne jamče dobra svojstva pougljičenih dijelova. Pad koncentracije ugljika kod profila prikazanog na slici 18a) je prestrm i prevelika je razlika tvrdoće, dok je rub kod obratka čiji je profil kao na slici 18b) previše pougljičen. Uslijed strmih padova tvrdoće može doći do otkrhuća površinske prevlake ili do utisnuća prevlake u površinu. Povoljno je da profil toka ugljika bude kao na slici 20, čime se postiže dobra jednolikost toka ugljika na rubu obratka, a pad sadržaja ugljika nije strm.



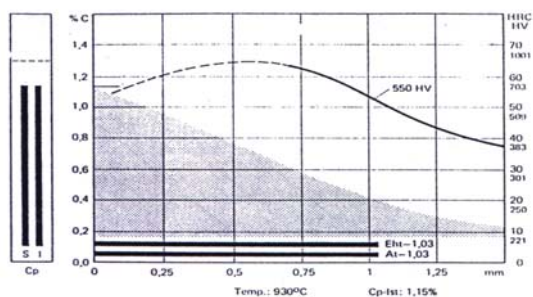
Slika 20. Shematski prikaz (povoljnog) profila toka ugljika za dvije postavljene vrijednosti, C_r i C_0 [10]

Osim profila tvrdoće, poželjno je i da količina zaostalog austenita bude što niža. Željeni profil toka ugljika nije moguće dobiti pougljičavanjem uz jedan, konstantni C-potencijal. Za taj je profil potrebno mijenjati C-potencijale ugljika prema fazama procesa.

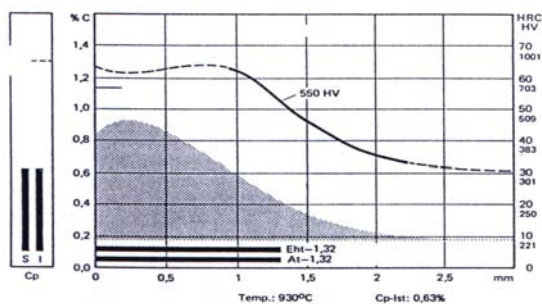
Na slici 21 a) - 21 d) prikazani su profili tokova ugljika, profili tvrdoće te količine očekivanog udjela zaostalog austenita tijekom pougljičavanja [11]. Međutim, treba napomenuti da se udio austenita odnosi na procjenu, jer količina zaostalog austenita ovisi o više tehnoloških čimbenika.



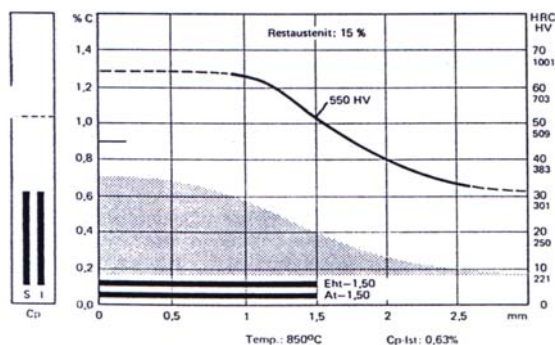
a)



b)



c)



d)

Slika 21. Profil toka ugljika i tvrdoće tijekom računalom vođenog procesa pougljičavanja [11]

Prva faza procesa vodi se uz konstantan C-potencijal koji je niži od granice čađe.

Pougljičavanje uz taj C-potencijal vodi se sve do gornje granice sadržaja ugljika na kojoj još neće doći do stvaranja karbida (slika 21 b). Tada se C-potencijal smanjuje i proces se vodi do kraja, s time da je cilj dobiti zadanu efektivnu dubinu pougljičavanja, ali i profil toka ugljika kao što je prikazano na slici 21 d). Pri planiranju vođenja ovoga procesa, treba voditi računa o postizanju traženih vrijednosti, ali istovremeno o trajanju procesa, što direktno utječe na ekonomičnost procesa. U prvoj fazi procesa, u kojoj se provodi pougljičavanje s maksimalnim C-potencijalom postavlja se cilj što bržeg pougljičenja do maksimalne dopuštene razine. Ovo je faza u kojoj se takvim vođenjem procesa postiže vremenska ušteda. Vođenjem procesa uz niži C-potencijal produljilo bi se vrijeme pougljičenja u prvoj fazi, a ne bi se postigli nikakvi dodatni bolji učinci.

Pougljičavanje je relativno spor proces, u cilju skraćivanja primjenjuje se navedeni postupak rada s maksimalno dopuštenim C-potencijalom i sniženje C-potencijala u drugoj fazi, s time da se postupak može voditi i u više faza, ovisno o zahtjevima na svojstva sloja.

2.3.2 Metode određivanja C-potencijala

Određivanje C-potencijala je od ključne važnosti za postupak pougljičavanja, jer direktno utječe na kvalitetu pougljičenog sloja. Razvijene su direktne i indirektne metode određivanja C-potencijala.

2.3.2.1 Direktne metode

Metoda folije

Folije debljine oko 50 μm izrađene od tehnički čistog željeza drže se u plinskoj atmosferi do dostizanja stanja ravnoteže (cca 30 min, ovisno o debljini folije i temperaturi plinske atmosfere). U brzo ohlađenoj foliji naknadno se u kemijskom laboratoriju metodom spaljivanja i apsorpcije određuje sadržaj ugljika (%C). Metoda je egzaktna te se može vrlo precizno odrediti C-potencijal plinske atmosfere, međutim, postupak je vrlo dug i ne može se primijeniti za kontinuirano reguliranje sastava plinske atmosfere nego samo za povremenu provjeru rezultata dobivenih drugim metodama [12].

Mjerenje električnog otpora

Kod ove se metode koristi svojstvo da električni otpor ovisi o sadržaju ugljika u čeliku (također i o visini temperature).

Tanka željezna žica izložena je djelovanju plinske atmosfere u peći. Kontinuiranim mjerenjem električnog otpora određuje se sadržaj ugljika u čeličnoj žici. Praktično provođenje mjerenja povezano je s mnogim poteškoćama kao što su: velika tromost, opasnost nastajanja karbida koji se sporo rastvaraju pri sniženju stvarnog C-potencijala i dr. Radi toga primjena ove metode nije raširena u praksi [12].

2.3.2.2 Indirektne metode

Određuju se plinske komponente koje su u ravnoteži s ugljikom u željeznoj foliji i na taj se način indirektno zaključuje o iznosu C-potencijala. Postupak kontrole plinskih komponenti je vrlo brz, a mjerne vrijednosti koje se koriste za kontinuirano mjerenje i reguliranje C-potencijala s relativno kratkim odzivom [12].

Mjerenje CO i CO₂

Iz tzv. Boudoardove konstante ravnoteže: $K_B = \frac{P^2_{CO}}{P_{CO_2} \cdot a_C}$ (za reakciju $CO_2 + [C] \rightarrow 2 CO$)

koja je funkcija temperature slijedi da je:

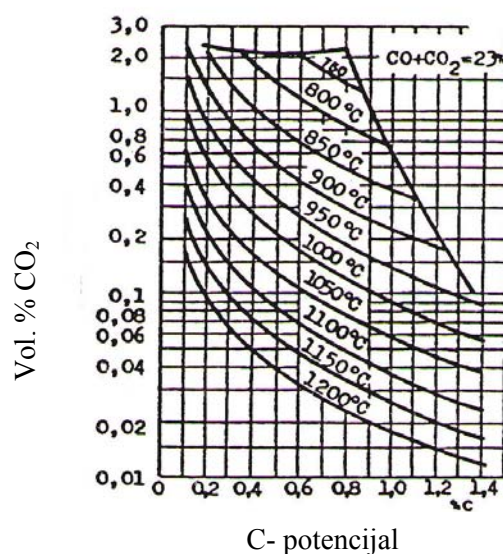
$$a_C = \frac{P^2_{CO}}{P_{CO_2} \cdot K_B}$$

Omjer $\frac{P^2_{CO}}{P_{CO_2}}$ pri određenoj temperaturi određuje "C-potencijal".

Primjenjuju se plinski analizatori koji se temelje na apsorpciji zraka određenih valnih dužina u infracrvenom području (odvojeno CO i CO₂).

Određivanje samo CO₂

U određenoj plinskoj atmosferi zbroj CO + CO₂ je konstantan (mijenja se samo omjer). Zato je moguće mjereći samo CO₂ zaključiti o iznosu C-potencijala za određeni zbroj CO + CO₂, a taj zbroj ovisi o polaznom plinu ugljikovodiku (najčešći se upotrebljavaju CH₄, C₃H₈) za proizvodnju plinske atmosfere.



Slika 22. Primjer određivanja C-potencijala na temelju mjerenja CO₂ [12]

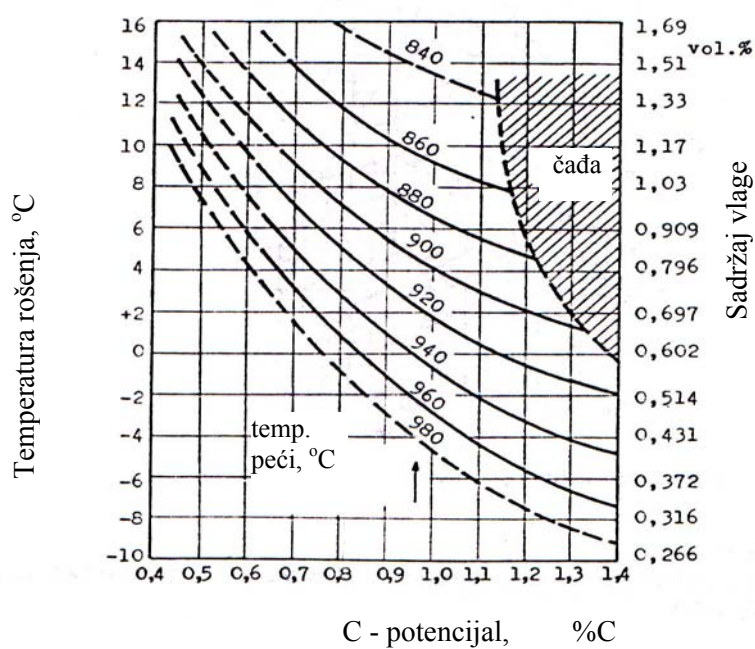
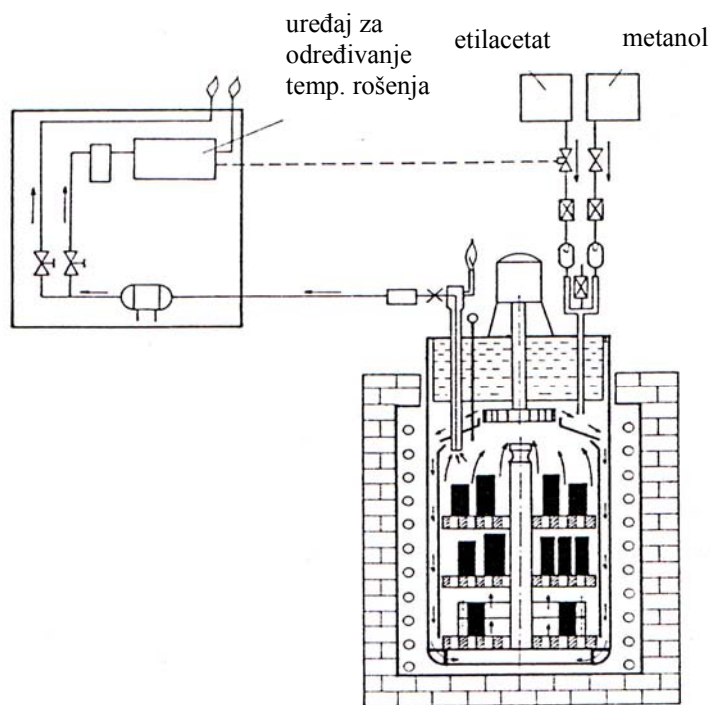
Određivanje vodene pare

Plinske atmosfere dobivene od ugljikovodika C_nH_n imaju za svaku vrstu ugljikovodika konstantni zbroj ($CO + CO_2$) i ($H_2 + H_2O$), pa se iz konstante ravnoteže

$$K_H = \frac{p_{CO} \cdot p_{H_2}}{p_{H_2O} \cdot a_C} \quad (\text{za reakciju } H_2O + [C] \rightarrow CO + H_2)$$

mjenjenjem p_{H_2O} mogu izračunati a_C , odnosno C-potencijal za dotičnu temperaturu. Uzorak plinske atmosfere odvodi se izvan peći, hladi i kontinuirano analizira sadržaj vlage pomoću analizatora.

Primjenjuju se različite fizikalne metode određivanja udjela vlage (H_2O) u plinu, a najčešće putem mjerenja temperature rošenja plinske atmosfere, jer je međusobni odnos poznat. Mjerenjem temperature rošenja moguće je tako indirektno odrediti C-potencijal plinske atmosfere pri određenoj temperaturi. Međusobni odnosi temperature rošenja i C-potencijala te temperature u peći vrijede posebno za svaku od vrsta plinskih atmosfera tj. za vrste ugljikovodika koji se primjenjuju za proizvodnju plinske atmosfere. Primjer mjerenja i principa određivanja temperature rošenja i reguliranje C-potencijala za atmosferu metanol / etilacetat prikazuje shema i dijagram na slici 23 [12].



Slika 23. Shema mjerenja i reguliranja C-potencijala na osnovi mjerenja temperature rošenja u plinskoj atmosferi metanol / etilacetat [12]

Primjena kisikove sonde

Odnosi plinskih komponenata koje sudjeluju u reakcijama pougljičavanja i razugljičavanja određuju C-potencijal plinskih atmosfera. Tako se omjer ugljikovih plinskih komponenata mijenja prema stupnju oksidacije:



(slično vrijedi i za $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$)

U plinskoj atmosferi prividno postoji kisik koji je u izravnoj vezi s omjerima plinskih komponenata koji definiraju C-potencijal. Mjereći, također, kisik (koji nije u slobodnom obliku molekularnog O_2) moguće je odrediti C-potencijal za određenu temperaturu i tip plinske atmosfere definirane zbrojevima ($\text{CO} + \text{CO}_2$) i ($\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}$).

Za mjerenje kisika u cilju određivanja C-potencijala u plinskim atmosferama za toplinsku obradu primjenjuje se poluvodički senzor stabiliziranog cirkonij oksida ZrO_2 koji se nalazi u plinskoj atmosferi. Jedna strana senzora izložena je plinskoj atmosferi nepoznatog parcijalnog tlaka kisika $p_{\text{O}_2}^x$, a druga strana se oplakuje referentnom atmosferom (najčešće zrak kod kojeg je parcijalni tlak kisika konstantan i iznosi $p_{\text{O}_2}^{\text{Ref}} = 0,21$). Pri visokim temperaturama u poluvodiču ZrO_2 ostvaruje se tijek iona kisika i elektrona što rezultira rasponom između platinskih elektroda koje su ugrađene s obje strane senzora. Napon sonde određen je jednadžbom

$$E = \frac{RT}{4F} \cdot \ln \frac{p_{\text{O}_2}^{\text{Ref}}}{p_{\text{O}_2}^x}$$

gdje je:

E - napon kisikove sonde, V

R - opća plinska konstanta, J/molK

T - apsolutna temperatura, K

F - Faradeyeva konstanta, J/V mol

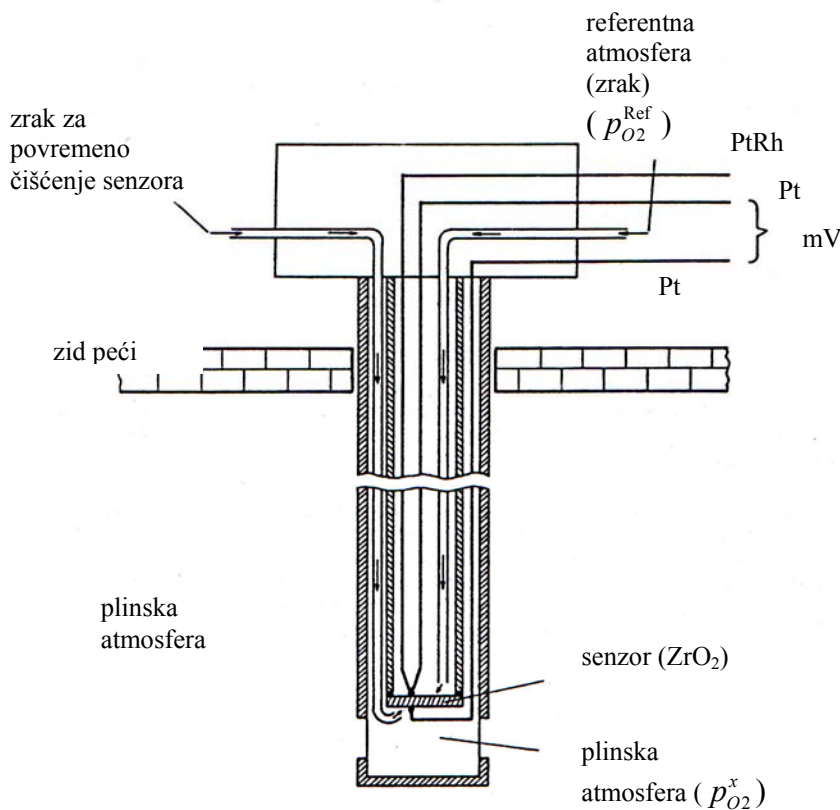
$p_{\text{O}_2}^{\text{Ref}}$ - referentni parcijalni tlak kisika, Pa

$p_{\text{O}_2}^x$ - mjereni parcijalni tlak kisika, Pa

Tako je napon tzv. kisikove sonde E(mV) mjera za C-potencijal plinske atmosfere za određenu temperaturu i vrstu plinske atmosfere ($\text{CO} + \text{CO}_2$) i ($\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}$).

Za provođenje mjerenja nije potrebno odvoditi uzorak plina do analizatora nego se senzor izravno ugrađuje u plinsku atmosferu. Na taj se način ostvaruje kontinuirano mjerenje s vrlo kratkim odzivom, pa je moguće lako ostvariti i precizno regulirati C-potencijal.

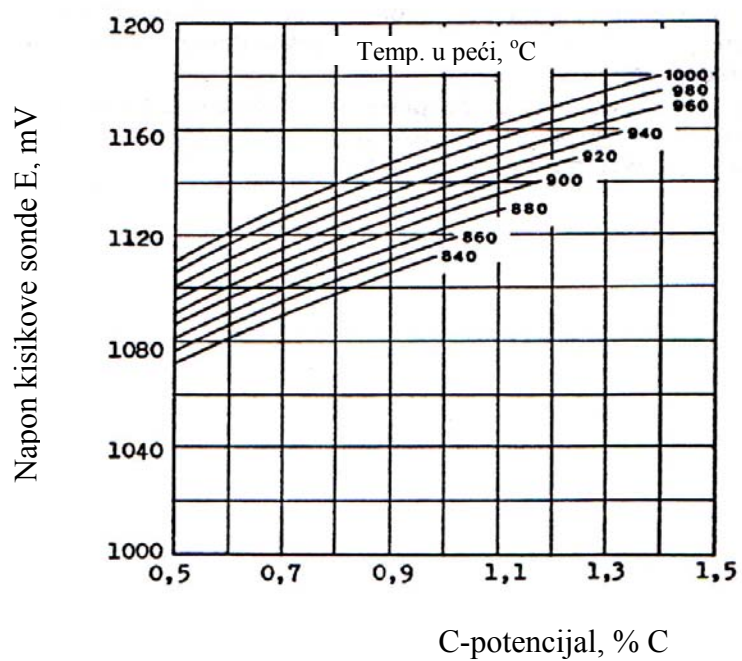
Skica principa mjerenja pomoću kisikove sonde i primjer dijagrama za određivanje C-potencijala prikazana je na slici 24. Moderni uređaji imaju odgovarajuće mikroprocesore pomoću kojih se mjerena vrijednost (mV) preračunava i iskazuje digitalno u obliku C-potencijala [12].



Endotermna plinska atmosfera na bazi propana

$$p_{CO} + p_{CO_2} = 0,23$$

$$p_{H_2} + p_{H_2O} = 0,32$$



Slika 24. Shema mjerenja i regulacije C-potencijala pomoću kisikove sonde [12]

2. 4 Izrada računalskog programa za simuliranje pougljičavanja

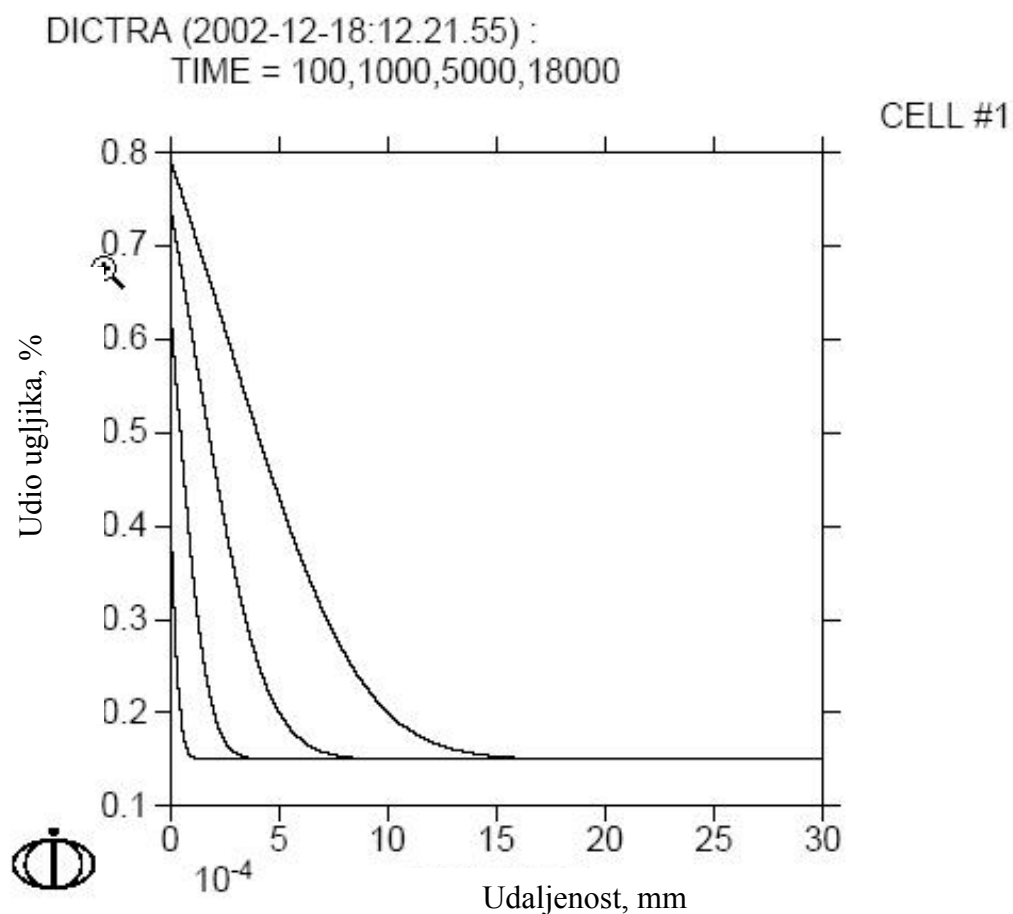
2.4.1 Razvoj na području računalskih programa za simuliranje pougljičavanja

Za simuliranje procesa pougljičavanja razvijeni su razni računalski programski paketi. Razvijali su ih znanstvenici i laboratoriji raznih proizvođača opreme za pougljičavanje; tim je programima popraćena suvremenija oprema za pougljičavanje. Prikaz ekrana jednoga od takvih računalskih paketa nalazi se u Prilogu 1.

Vidljivo je da je proces također vođen na takav način da se dobije što horizontalniji tijek sadržaja ugljika u rubnom dijelu čelika. U gornjem dijelu prikaza ekrana navedene su vrijednosti koje korisnik unosi za vođenje procesa.

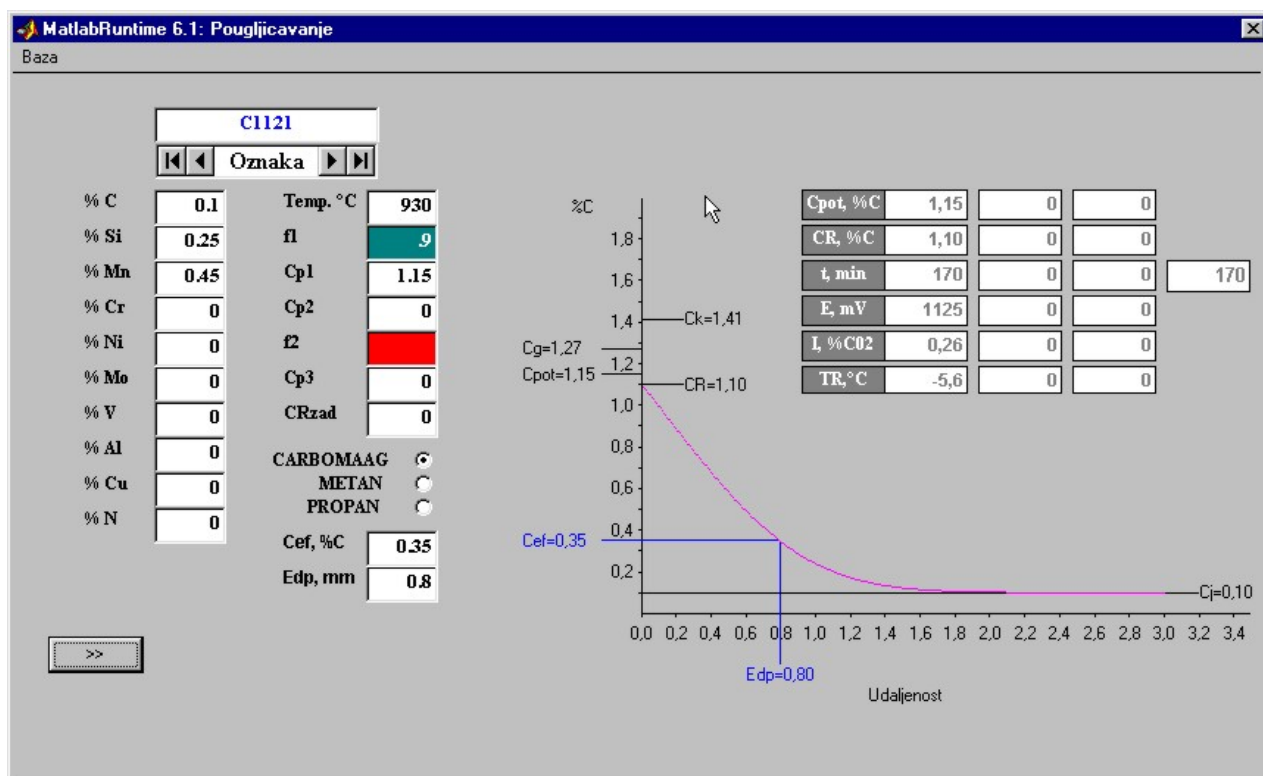
Također, većina je većih firmi koje proizvode opremu za pougljičavanje razvila računalske pakete kojima se simuliraju postupci pougljičavanja. Primjerice, firma Ipsen je razvila paket Carb-o-Prof; prikaz ekrana toga paketa nalazi se u Prilogu 2.

Grupa švedskih znanstvenika iz Stockholm Technology Park, u okviru softvera Thermo-Calc izradila je paket Dictra za simuliranje difuzijskih postupaka. Softver obuhvaća široko područje difuzijskih postupaka, a među njima i područje pougljičavanja. Prikaz ekrana paketa Dictra nalazi se na slici 25.



Slika 25. Ekran paketa DICTRA koji se nalazi u sklopu softvera Thermo-Calc

Na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje izrađen je softverski paket PUPA. Ovaj računalski program vodi proces pougljičavanja s jednom, konstantnom, vrijednošću C-potencijala, do postizanja tražene (zadane) efektivne dubine pougljičavanja. Završni je stupanj procesa kao što prikazuje slika 26.



Slika 26. Završni stupanj u programu PUPA, uz konstantni C-potencijal

2.4.1.1 Izrada programa za izračun potrebne mase ugljika kod pougljičavanja prije difuzijskog stvaranja karbida

Kao prvi korak izrađen je program za izračun mase ugljika koju treba unijeti u čelik po jediničnom volumenu, prije procesa difuzijskog stvaranja karbida. Taj će uneseni ugljik naknadno poslužiti za difuzijsko stvaranje karbida, čime se onemogućuje osiromašenje sloja ugljikom i stvaranje oslabljene baze za stvoreni karbidni sloj.

Postavke:

Karbidi imaju opću kemijsku formulu Me_xC_y , pri čemu simbol "Me" predstavlja atom metala, karbidotvornog elementa, a "C" predstavlja ugljik. Tako se za određeni tip karbida u jediničnom volumenu izračunava masa ugljika koju je prethodno potrebno unijeti u čelik, a koja naknadno služi za stvaranje karbidnih spojeva.

- izračun volumena jediničnog sloja

$$V_{Me_xC_y} = A \cdot d \quad (12)$$

pri čemu je

$V_{Me_xC_y}$ - volumen jediničnog sloja [cm^3]

A - jedinična površina [cm^2]

d - debljina jediničnog sloja [cm]

- izračun mase sloja

$$m_{Me_xC_y} = V_{Me_xC_y} \cdot \rho_{Me_xC_y} \quad (13)$$

$m_{Me_xC_y}$ - masa jediničnog sloja [g]

$V_{Me_xC_y}$ - volumen jediničnog sloja [cm^3]

$\rho_{Me_xC_y}$ - gustoća karbida [g/cm^3]

- izračun potrebne mase ugljika koju treba unijeti u jedinični sloj u kojemu će difuzijski nastajati karbidi

$$m_C = m_{Me_xC_y} \cdot w_C = A \cdot d \cdot \rho_{Me_xC_y} \cdot w_C \quad (14)$$

w_C - maseni udio ugljika (%)

$$w_C = \frac{y \cdot m_C}{x \cdot m_{Me} + y \cdot m_C} \quad (15)$$

pri čemu:

y - broj atoma ugljika u molekuli karbida

x - broj atoma metala u molekuli karbida

m_{Me} - atomska masa atoma metala

$m_C = 12,01$ - atomska masa atoma ugljika

Potrošnja ugljika u jediničnom sloju s idealnim tj. konstantnim tokom ugljika računalski se može pratiti programom poput donjega, koji je prvi izrađen:

Izračun

Izbor vrste karbida MeC_y Jedinični volumen sloja V_{jed} Izračun masenih udjela ugljika Info

Unesite vrijednosti :

$x =$ br. atoma metala

$y =$ br. atoma ugljika

$m_{Me} =$ atomarna masa elementa

$\rho =$ kg/m³

Odabrani metal je :

Jedinična površina:

cm²

Debljina jediničnog sloja:

μm

Maseni udio ugljika u jediničnom sloju :

$w_C (Me_x C_y) =$

Masa ugljika u jediničnom sloju :

$m_{C\text{ jed}} =$ g

Volumen iznosi:

$V_{jed} =$ cm³

Slika 27. Program za izračun potrošnje ugljika za stvaranje karbida u sloju s konstantnim tokom (profilom) ugljika

Gornji je program prikladan samo za izračun mase ugljika koja se unosi u jedinični volumen, ukoliko je udio ugljika konstantan. Međutim, tijekom vremena udio ugljika od površine prema jezgri opada, u skladu sa slikom 28, to je prilikom izrade programa uzeto u obzir, time što je za izračun mase ugljika korištena jednažba (16):

- izračun mase ugljika u vremenu t

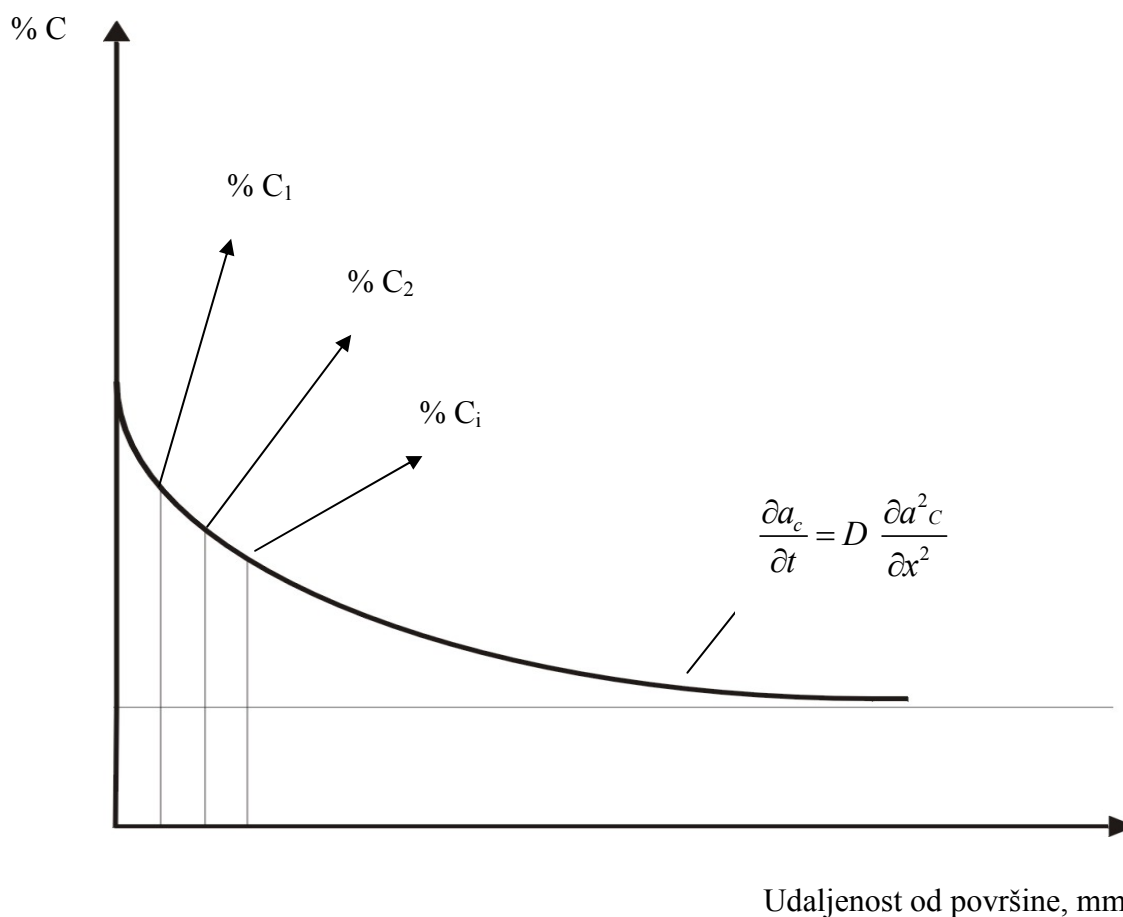
$$m_{C_\varepsilon} = m_\varepsilon \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \%C_i - C_j}{100} \quad (16)$$

$$m_\varepsilon = V_\varepsilon \cdot \rho_\varepsilon$$

$$\rho_\varepsilon = 7850 \text{ kg/m}^3$$

Proces se odvija prema jednadžbi (17):

$$\frac{\partial a_c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 a_c}{\partial x^2} \quad (17)$$



Slika 28. Prikaz podjele sloja u kojemu se izračunava masa unesenog ugljika

Udio ugljika izračunava se prema jednadžbi (17), a suma odsječaka ispod krivulje predstavlja integral površine ispod krivulje na slici 28.

Pregled ulaznih podataka za pojedine vrste karbida nalazi se u Tablici 1.

Tablica 1. Podaci o karbidima metala

vrsta karbida	gustoća karbida, $\rho_{Me_xC_y}$ [kg/m ³]	atomska masa atoma metala u molekuli karbida, m_{Me}	x	y
Cr ₇ C ₃	6800	52	7	3
NbC	8200	92.9064	1	1
V ₈ C ₇	5410	50.942	8	7
TiC	4250	47.9	1	1
WC	15700	183.85	1	1

Proces se vodi do trenutka dok se u čelik ne unese masa ugljika koja je potrebna za stvaranje karbida, tj. dok $m_{C_e} \geq m_C$

Neki primjeri pougljičavanja prije stvaranja karbida, dobiveni izrađenim računalskim programom:

POUGLJIČAVANJE PRIJE STVARANJA KARBIDA

%C	0.46
%Si	0.25
%Mn	0.65
%Cr	0
%Mo	0
%V	0
%Ni	0
%W	0

CELIK **C1530**
KARBID **V8C7**

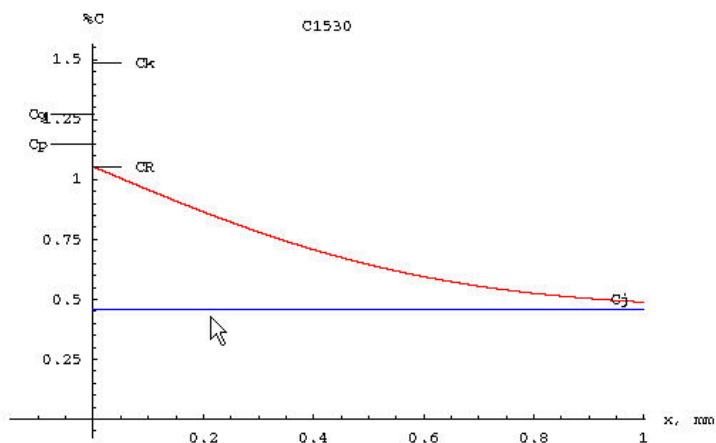
Rezultati

Cp [%C]	Cr [%C]	E [mV]	I [%Co2]	Tr [%C]	t [min]
1.14597	1.05348	1141.89	0.18854	-1.30492	115.
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	115.

Atmosfera

- ☒ Carbomaag
☐ propan
☐ metan

temperatura, [C]	930
d, μm	20
dt, min	0.5
f, faktor Cg, Ck	0.90



Start

Izlaz

Slika 29. Pougljičavanje prije stvaranja karbida V₈C₇ na Č1530, debljine 20 μm, na temperaturi 930 °C, uz f = 0,9

POUGLJICAVANJE PRIJE STVARANJA KARBIDA

%C	0.46
%Si	0.25
%Mn	0.65
%Cr	0
%Mo	0
%V	0
%Ni	0
%W	0

CELIK **C1530**
KARBID **V8C7**

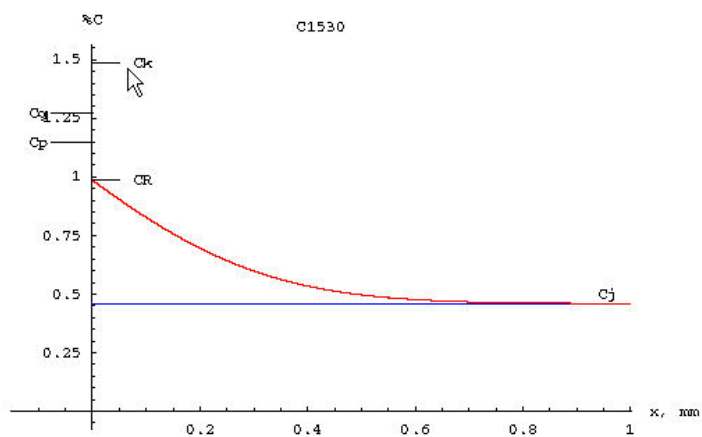
Rezultati

Cp [%C]	Cr [%C]	E [mV]	I [%Co2]	Tr [%C]	t [min]
1.14597	0.985537	1141.89	0.18854	-1.30492	38.
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	38.

Atmosfera

- ☒ Carbomaag
☐ propan
☐ metan

temperatura, [C]	930
d, μm	10
dt, min	0.5
f, faktor Cg, Ck	0.90



Start Izlaz

Slika 30. Pougličavanje prije stvaranja karbida V_8C_7 na Č1530, debljine 10 μm , na temperaturi 930 °C, uz $f = 0,9$

POUGLJICAVANJE PRIJE STVARANJA KARBIDA

%C	0.46
%Si	0.25
%Mn	0.65
%Cr	0
%Mo	0
%V	0
%Ni	0
%W	0

CELIK **C1530**
KARBID **Cr7C3**

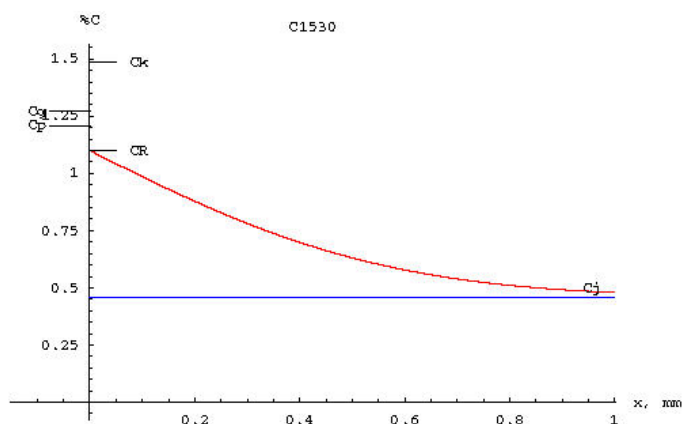
Rezultati

Cp [%C]	Cr [%C]	E [mV]	I [%Co2]	Tr [%C]	t [min]
1.20963	1.10004	1144.68	0.178724	-1.94083	96.
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	96.

Atmosfera

- ☒ Carbomaag
☐ propan
☐ metan

temperatura, [C]	930
d, μm	30
dt, min	0.5
f, faktor Cg, Ck	0.95



Start Izlaz

Slika 31. Pougličavanje prije stvaranja karbida Cr_7C_3 na Č1530, debljine 30 μm , na temperaturi 930 °C, uz $f = 0,95$

POUGLJICAVANJE PRIJE STVARANJA KARBIDA

%C	0.9
%Si	0.25
%Mn	2.
%Cr	0
%Mo	0
%V	0.1
%Ni	0
%W	0

CELIK **C3840**
KARBID **Cr₇C₃**

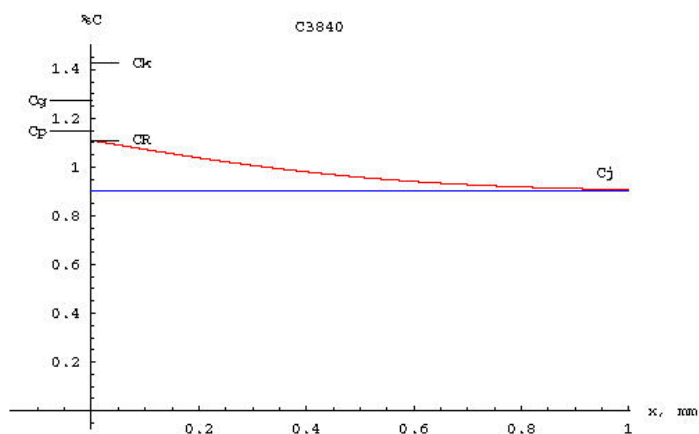
Atmosfera

- ☒ Carbomaag
☐ propan
☐ metan

temperatura, [C]	930
d, μm	10
dt, min	0.5
f, faktor C _g , C _k	0.9

Rezultati

Cp [%C]	Cr [%C]	E [mV]	I [%Co2]	Tr [%C]	t [min]
1.14597	1.10968	1141.89	0.18854	-1.30492	99.
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	99.



Start Izlaz

Slika 32. Pouglijčavanje prije stvaranja karbida Cr₇C₃ na Č3840, debljine 10 μm, na temperaturi 930 °C, uz f = 0,9

POUGLJICAVANJE PRIJE STVARANJA KARBIDA

%C	0.9
%Si	0.25
%Mn	2.
%Cr	0
%Mo	0
%V	0.1
%Ni	0
%W	0

CELIK **C3840**
KARBID **Cr₇C₃**

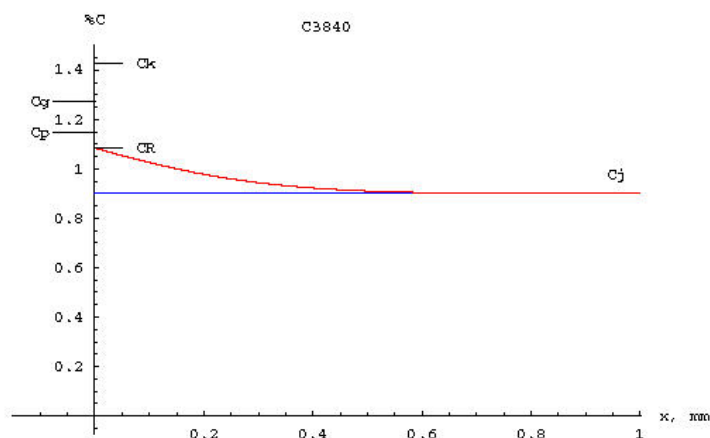
Atmosfera

- ☒ Carbomaag
☐ propan
☐ metan

temperatura, [C]	930
d, μm	5
dt, min	0.5
f, faktor C _g , C _k	0.9

Rezultati

Cp [%C]	Cr [%C]	E [mV]	I [%Co2]	Tr [%C]	t [min]
1.14597	1.08457	1141.89	0.18854	-1.30492	34.
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	34.



Start Izlaz

Slika 33. Pouglijčavanje prije stvaranja karbida Cr₇C₃ na Č3840, debljine 5 μm, na temperaturi 930 °C, uz f = 0,9

2.4.1.2 Izrada programa za simuliranje toka pougljičavanja u sklopu cementiranja

Pri izradi programa slijeđene su ranije iznešene teorijske postavke za vođenje procesa pougljičavanja.

Jedno od vodećih načela za vođenje procesa pougljičavanja, oko kojega su suglasni razni autori koji su se bavili pougljičavanjem ili izradom programa za simuliranje pougljičavanja jest izbjegavanje nastajanja karbida. Ponekad se proces namjerno vodi tako da nastaju karbidi, jer su vrlo otporni na trošenje. Međutim, to su slučajevi s posebnim zahtjevima, primjerice, kod alatnih i nerđajućih čelika. Poznati su primjeri stvaranja karbida na alatnim čelicima za topli rad, posebice na alatima za kovanje, pri čemu alat ima višestruko dulji životni vijek. Kod uobičajenih postupaka pougljičavanja čelika za cementiranje karbidi su uglavnom štetni, iako karbidi koji su dispergirani u matrici neće značajno utjecati na dotrajavanje dijela. Veća su opasnost mrežni ili aglomerirani karbidi, koji mogu predstavljati generator loma ili mogu značajno utjecati na zamor materijala. Iako se razmatranje utjecaja karbida mora obaviti ovisno o svakom specifičnom dijelu i procijeniti utjecaj eventualnih karbida na taj dio (pri čemu se često ne odbacuju dijelovi s malim udjelom fino dispergiranih karbida), ipak će sprečavanje nastajanja karbida biti jedan od ulaznih zahtjeva kod provođenja procesa, čime će se postići stupanj sigurnosti i primjenjivost programa i za zahtjevnije slučajeve.

Ulazne pretpostavke za program: efektivna dubina pougljičavanja, E_{dp} - dubina pougljičavanja na kojoj je sadržaj ugljika 0,35%C (C_{ef}) i na kojoj se kasnijim kaljenjem postiže granična tvrdoća od 550 HV.

Oznake:

C_p - postavni C-potencijal atmosfere

C_r - sadržaj ugljika na površini čelika

C_g - granica čađe

$C_{g\ dop}$ - dopuštena granica čađe = $f_1 C_g$

f_1 - faktor granice čađe

C_k - granica karbida

$C_{k\ dop}$ - dopuštena granica karbida = $f_2 C_k$

f_2 - faktor sniženja C-potencijala ispod granice nastajanja karbida

C_1 - završni postotak ugljika

C_{gr1} - donja tolerancija završnog C_R

C_{gr2} - gornja tolerancija završnog C_R

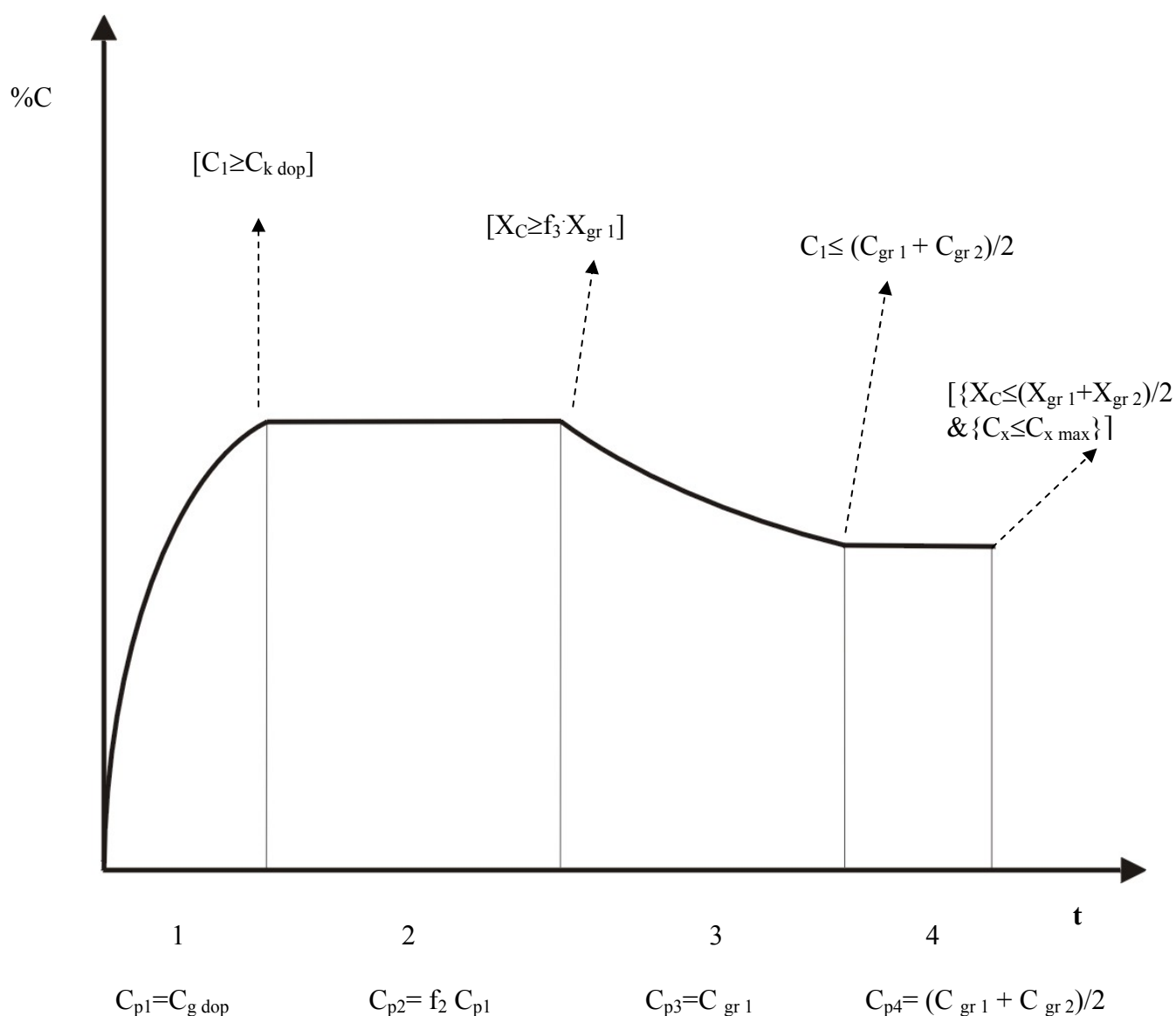
E_{dp} - efektivna dubina cementiranja

X_{gr1}, X_{gr2} - tolerancija za E_{dp}

C_x - najveći C-potencijal profila

$C_{x\max}$ - max. dopušteni završni C_x

f_3 - faktor tolerancije efektivne dubine cementiranja



Slika 34. Prikaz koraka vođenja procesa pougljičavanja

Radi ekonomičnosti procesa (tj. radi njegova što kraćega trajanja), u površinu čelika u što kraćem vremenu treba unijeti što veću količinu ugljika, koja se kasnije difuzijom odvodi u unutrašnjost čelika. To unošenje ugljika treba provesti tako da ne dođe do štetnog stvaranja karbida u čeliku i izdvajanja čađe na površini čelika. Stoga početni C-potencijal (uz koji se proces provodi u početnoj fazi) mora biti niži od granice čađe. Ako bi u toj fazi došlo do stvaranja čađe, ona bi blokirala kasniji ulazak ugljika u površinu čelika. Stoga se početni C-potencijal određuje umnoškom granice čađe s faktorom, što se naziva dopuštenom granicom čađe (kojega korisnik bira na ulaznom zaslonu programa, preporučljivo 0,85-0,95).

Pougličavanje uz ovaj, maksimalno dopustivi, C-potencijal može se provoditi do postizanja koncentracije ugljika koja još uvijek jamči da neće doći do stvaranja karbida, do tzv. dopuštene granice karbida (granica karbida množi se sigurnosnim faktorom, kojega korisnik bira na ulaznom zaslonu programa).

Nakon završetka 1. faze, pougličavanje uz C-potencijal koji je jednak dopuštenoj granici karbida provodi se do postizanja tolerancijske vrijednosti efektivne dubine pougličavanja. Nakon postizanja te vrijednosti, dalje se pougličavanje obavlja uz C-potencijal koji je jednak tolerancijskoj vrijednosti završnog C-potencijala.

Kada se dosegne efektivna dubina pougličavanja, proces se nastavlja u četvrtoj fazi do ispunjenja željenog profila toka ugljika. U tom koraku treba postići da je najveći C-potencijal profila manji od maksimalno dopuštenog C-potencijala profila. Time će se i dubina pougličavanja povećati i biti veća od aritmetičke sredine tolerancijskih vrijednosti dubina pougličavanja, međutim prvenstveni je cilj ovoga posljednjega koraka dobivanje toka ugljika koji jamči najbolja mehanička svojstva i pri čemu ne dolazi niti do naglog pada tvrdoće po presjeku niti do prejakog pougličanja.

Zahtijevano:

- efektivna dubina pougličavanja, Edp
- sadržaj ugljika na efektivnoj dubini pougličavanja (0,35 %C)

Zadano:

- maksimalni dopušteni završni C-potencijal

- sadržaj ugljika na rubu, C_r (obično 0.8-0.9, s time da razlika između maksimalnog sadržaja ugljika u profilu ugljika, $C_{x \max}$ i sadržaja ugljika na rubu ne smije biti veća od 0.05)

Odabrano:

- vrsta čelika (kemijski sastav) - ovisno o vrsti čelika određuje se granica čađe i granica karbida
- početni C-potencijal (ovisno o vrsti čelika); postavlja se da je $C_{p1} = f_1 C_g$ (f_1 je faktor, <1 , odabire ga korisnik, obično u granicama 0,85 - 0,95)
- drugi C-potencijal (odabire se pomoću faktora f_2)
- vrsta plina kojim se provodi proces pougljičavanja
- temperatura procesa (ovisno o vrsti čelika)

Faza 1: $C_p = C_{g \text{ dop}}$

Završetak kada: ili 1) $C_1 = C_{k \text{ dop}}$...početak faze 2

ili 2) $X_C \geq f_3 \cdot X_{gr1}$...početak faze 3 (preskočena faza 2)

Faza 2: $C_p = f_2 C_{p1}$

Završetak kada: $X_C \geq f_3 \cdot X_{gr1}$...početak faze 3

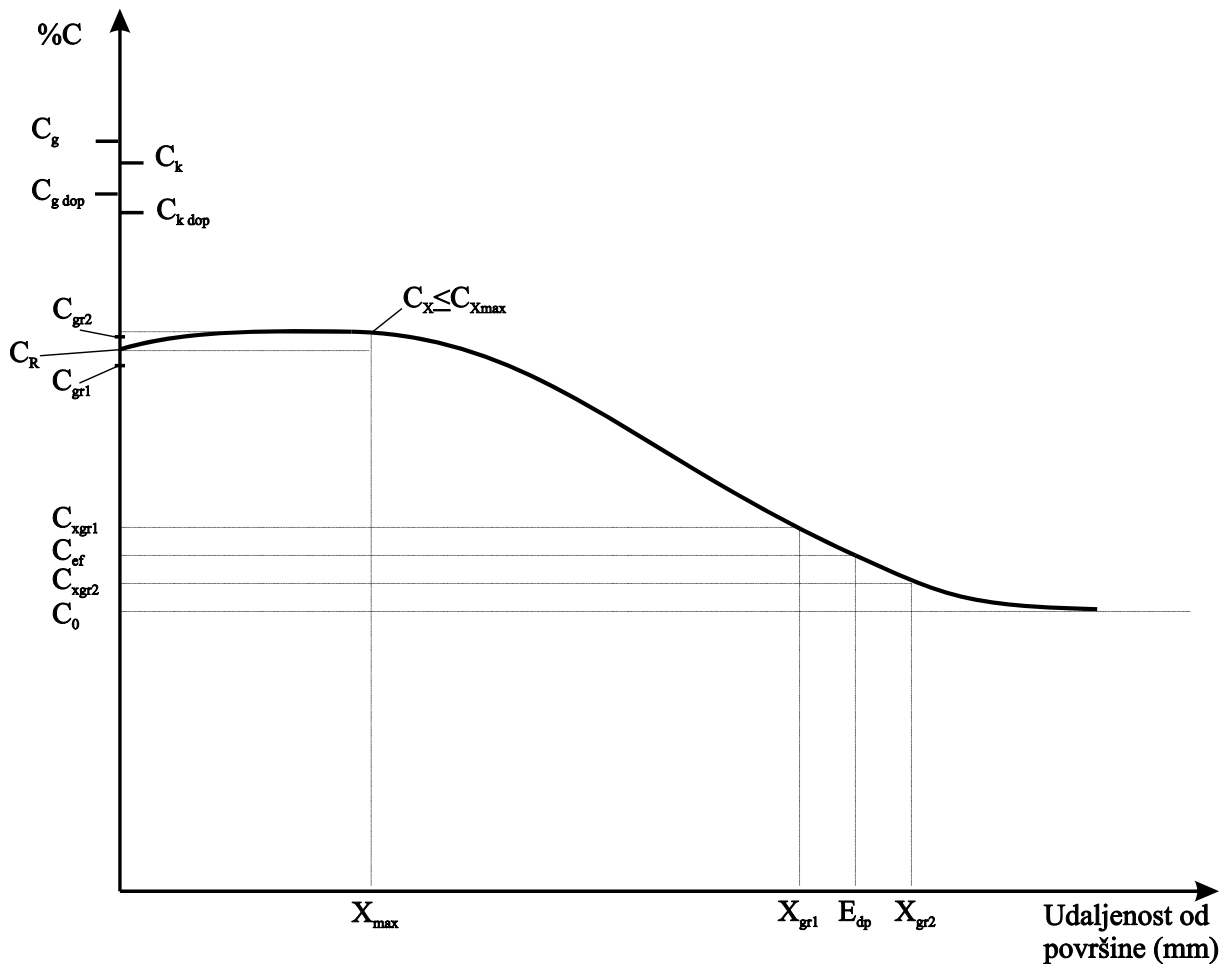
Faza 3: $C_p = C_{gr1}$

Završetak kada: $C_1 \leq (C_{gr1} + C_{gr2})/2$...početak faze 4

Faza 4: $C_p = (C_{gr1} + C_{gr2})/2$

Završetak kada: $X_C \leq (X_{gr1} + X_{gr2})/2$ & $(C_x \leq C_{x \max})$... to je i završetak čitavog procesa

Završni profil ugljika ovisno o udaljenosti od površine prikazan je na slici 35.



Slika 35. Završni profil sadržaja ugljika ovisno o udaljenosti od površine

Vrijednosti uz sliku 35:

- 1) $C_{gr1} \leq C_r \leq C_{gr2}$
- 2) $X_{gr1} \leq X_{gr2}$, $X_{gr1} = E_{dp} - 0,05$, $X_{gr2} = E_{dp} + 0,05$
- 3) $C_x \leq C_{xmax}$, $C_{xmax} = C_r + 0,05$

C_g ...granica čađe

$C_{g\ dop}$...dopuštena granica čađe... $C_{g\ dop} = f_1 C_g$

f_1 ... sigurnosni faktor za granicu čađe, 0,85-0,95

C_k ...granica karbida

$C_{k\ dop}$...dopuštena granica karbida, $C_{k\ dop} = f_2 f_{kor} C_k$

f_2 ...sigurnosni faktor za granicu karbida, 0,85-0,95

f_{kor} ...faktor korekcije

$C_{x\ max}$ - max. dopušteni završni sadržaj ugljika

Funkcija za izračun granice grafita (čade) i granice karbida u austenitnom području (jednadžbe funkcija su dobivene parametriziranjem linija granice grafita i granice karbida, prema slici 1):

$$C_g = -2,21432 + 0.0054 T - 2.96375 \cdot 10^{-6} T^2 + 1,27924 \cdot 10^{-9} T^3 \quad (18)$$

$$C_k = 2,57387 - 0,00961 T + 1,32179 \cdot 10^{-5} T^2 - 4,57619 \cdot 10^{-9} T^3 \quad (19)$$

T - temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

Proces se odvija prema izrazu koji se temelji na aktivnostima ugljika:

$$\partial a_c / \partial t = D(\partial^2 a_c / \partial x^2) \quad (20)$$

1) Unutar jednog odabranog vremenskog koraka, pretpostavke su sljedeće:

- a) $D = \text{konst.}$
- b) $C_p = \text{konst.}$; C_p = potencijal ugljika u atmosferi
- c) $T = \text{konst.}$; T = temperatura predmeta i atmosfere [K]

$$2) \partial T / \partial x = 0$$

$$3) \partial C_{n+1} / \partial t = 0, C_{n+1} - \text{koncentracija ugljika iza posljednje razmatrane točke}$$

Raspodjela aktivnosti ugljika u vremenu « t » na udaljenosti « x »:

$$a_c^{xt} = a_c^0 + (a_c^p - a_c^0) \cdot \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{\frac{D}{K} + x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right] \quad (21)$$

a_c^{xt} - aktivnost ugljika u vremenu t na udaljenosti x

a_c^0 - aktivnost ugljika u vremenu t , na udaljenosti $x=0$

a_c^p - aktivnost ugljika na faznoj granici

D - koeficijent difuzije ugljika [m^2/s], izračun prema jednadžbi (24)

K - koeficijent prijelaza ugljika [m/s]

x - udaljenost od površine [m]

t - vrijeme [s]

Općeniti izraz za izračun aktivnosti ugljika ovisno o udjelu ugljika:

$$a_C = 10^{\left(\frac{2300}{T} - 2,21 + 0,151C + 0,434 \ln \frac{\frac{C}{12,01}}{\frac{C}{12,01} + \frac{100-C}{55,85}} \right)} \quad (22)$$

T - temperatura [K]

C - udio ugljika

a_C - aktivnost ugljika

Izračun konstante korekcije utjecaja legirnih elemenata na aktivnost ugljika:

$\log f_{kor} = 0,055 \text{ Si} - 0,013 \text{ Mn} - 0,04 \text{ Cr} + 0,014 \text{ Ni} - 0,013 \text{ Mo} - 0,102 \text{ V} - 0,014 \text{ Al} - 0,006 \text{ Cu} + 0,22 \text{ N}$

$$f_{kor} = 10^{(0,055 \text{ Si} - 0,013 \text{ Mn} - 0,04 \text{ Cr} + 0,014 \text{ Ni} - 0,013 \text{ Mo} - 0,102 \text{ V} - 0,014 \text{ Al} - 0,006 \text{ Cu} + 0,22 \text{ N})} \quad (23)$$

Jednadžba difuzije ugljika u krutom rastvoru (austenit):

$$D = D_0 \cdot e^{-Q/T} = 792 \cdot e^{-21000/T} \quad (24)$$

T - temperatura [K]

e = 2,71828

Konstante postupka, K i P:

K	metan	propan	CARBOMAAG
	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$
P (C0+C0 ₂)	metan	propan	CARBOMAAG
	0,20	0,23	0,33

Svođenje aktivnosti ugljika na koncentraciju ugljika

$$\log a_{C_{xt}} = \frac{2300}{T} - 2,21 + 0,15C_{xt} + 0,434 \cdot \ln \frac{\frac{C_{xt}}{12,01}}{\frac{C_{xt}}{12,01} + \frac{100-C_{xt}}{55,85}} \quad (25)$$

$$a_{C_{xt}} = 10^{\left(\frac{2300}{T} - 2,21 + 0,151 C_{xt} + 0,434 \cdot \ln \frac{\frac{C_{xt}}{12,01}}{\frac{C_{xt}}{12,01} + \frac{100 - C_{xt}}{55,85}} \right)} \quad (26)$$

C_{xt} - sadržaj ugljika na udaljenosti x u vremenu t

T - temperatura [K]

$a_{C_{xt}}$ - aktivnost ugljika na udaljenosti x u vremenu t

Iz jednadžbe (25) treba izračunati C_{xt} te parove vrijednosti x , C_{xt} ucrtati u dijagram toka ugljika u pougljičenom sloju. C_{xt} se iz jednadžbe (26) računa računalskom iteracijom.

Gornji se izraz može primijeniti kod rada sa samo jednim C-potencijalom, što iz razloga ekonomičnosti i zbog kvalitete pougljičenih slojeva koji se time dobivaju ne može biti postupak koji bi se primijenio u proizvodnim procesima.

Realno je da se proces vodi s dva C-potencijala, izračun tada treba obaviti metodom konačnih volumena, kojima se prati transport ugljika kroz volumenske odsječke. To znači da se u ostalim fazama proces odvija uz već unesenu količinu ugljika u čelik te se svaka nova krivulja toka ugljika računa na temelju već unesenih količina ugljika na pripadajućoj udaljenosti od površine.

Proces se može kontrolirati kisikovom sondom ili regulatorom koji mjeri temperaturu rošnja (ili obim instrumentima).

Kod kisikove sonde, napon (E) i struja (I) sonde izraženi su izrazom:

$$E = 1464 - 0,46T - 0,0992T \cdot 0,4343 \cdot \ln \left(\sqrt{1 + \frac{4P}{C_p \cdot B}} - 1 \right) \quad (27)$$

$$B = 10^{(-8920/T + 9,11)}$$

P - konstanta postupka za pojedine vrste atmosfera ($CH_4=0,20$, $C_3H_8=0,23$, Carbomaag= $0,33$)

C_p - potencijal ugljika u atmosferi

T - temperatura, K

$$I = 100 \cdot P \frac{1}{1 + 10^{(10,08 \cdot \frac{E}{T} - \frac{14758}{T} + 4,94)}} \quad (28)$$

I - udio ($CO+CO_2$)

E - napon sonde, mV

T - temperatura, K

Temperatura rošnja, T_R , računa se pomoću donjih izraza:

$$R = 0.4343 \cdot \ln((760 \cdot p_H) / (1 + 10^{((10.08 \cdot E / T) - (13000 / T) + 3.31)})) \quad (29)$$

p_H - konstanta, $p_H=0,32$ za propan, $p_H=0,66$ za Carbomaag

T - temperatura, K

E - napon sonde, mV

$$\text{Temp. } R = (2257 / (8.95 - R)) - 273.15$$

$$TR = ((\text{Temp. } R \cdot 10) + 0.5) / 10 \quad (30)$$

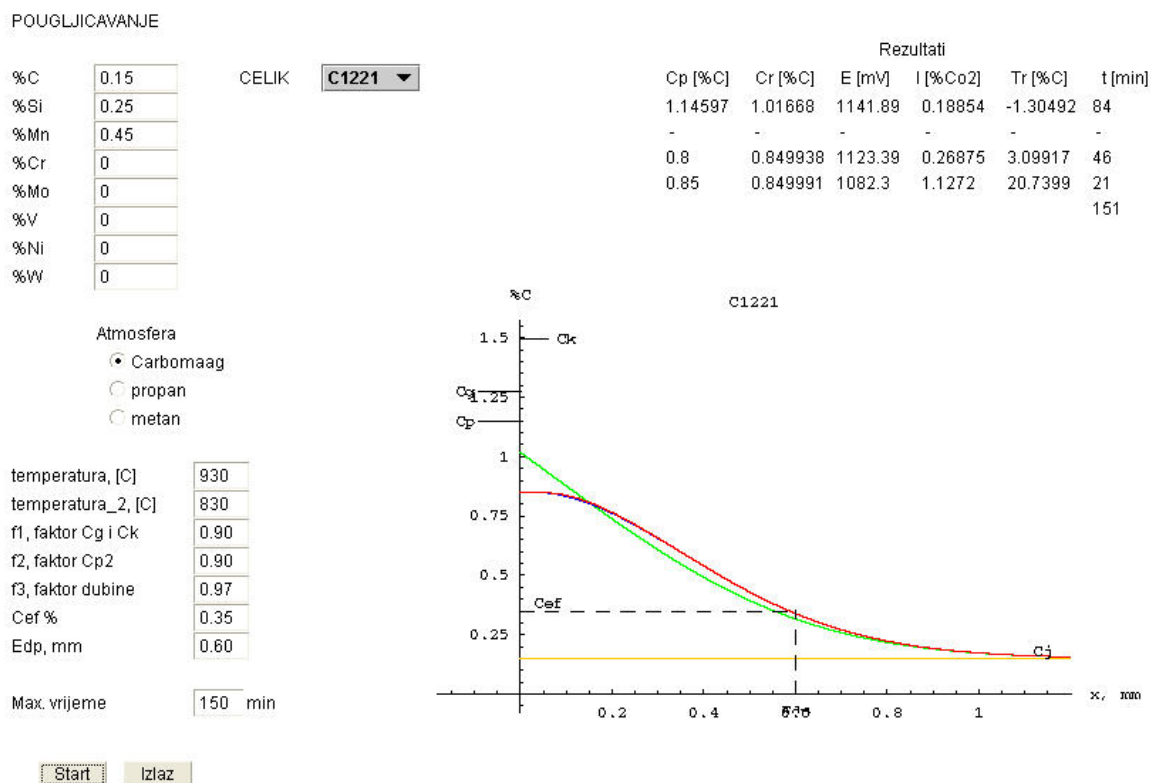
Ako je $TR < 0$, onda se TR računa prema donjem izračunu

$$\text{Temp. } R = (2684 / (10.5 - R)) - 273.15$$

$$TR = ((\text{Temp. } R \cdot 10) + 0.5) / 10 \quad (31)$$

TR - temperatura rošenja, °C

Računalski je program izrađen u programskom paketu MATHEMATICA. Neki primjeri simulacije procesa dobivenih računalskim programom za pougljičavanje u sklopu postupka cementiranja:



Slika 36. Pougljičavanje Č1221, uz $f_1=0,9$, $f_2=0,9$, $f_3=0,97$, $Edp=0,60$, uz trajanje procesa od 150 minuta

POUGLJICAVANJE

%C	0.15
%Si	0.25
%Mn	0.45
%Cr	0
%Mo	0
%V	0
%Ni	0
%W	0

CELIK **C1221**

Atmosfera

- ☒ Carbomaag
☐ propan
☐ metan

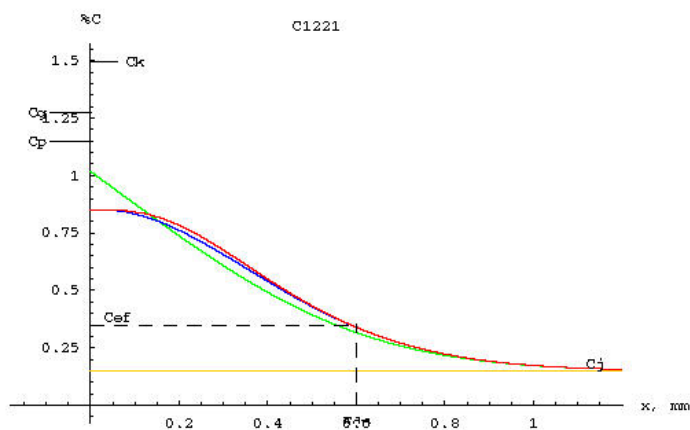
temperatura, [C]	930
temperatura_2, [C]	830
f1, faktor Cg i Ck	0.90
f2, faktor Cp2	0.90
f3, faktor dubine	0.97
Cef %	0.35
Edp, mm	0.60

Max. vrijeme 200 min

Start Izlaz

Rezultati

Cp [%C]	Cr [%C]	E [mV]	I [%Co2]	Tr [%C]	t [min]
1.14597	1.01668	1141.89	0.18854	-1.30492	84
0.8	0.849938	1123.39	0.26875	3.09917	46
0.85	0.849995	1082.3	1.1272	20.7399	71
					201

Slika 37. Pouglijčavanje Č1221, uz $f_1=0,9$, $f_2=0,9$, $f_3=0,97$, $Edp=0,60$, uz trajanje procesa od 200 minuta

POUGLJICAVANJE

%C	0.15
%Si	0.25
%Mn	0.45
%Cr	0
%Mo	0
%V	0
%Ni	0
%W	0

CELIK **C1221**

Atmosfera

- ☒ Carbomaag
☐ propan
☐ metan

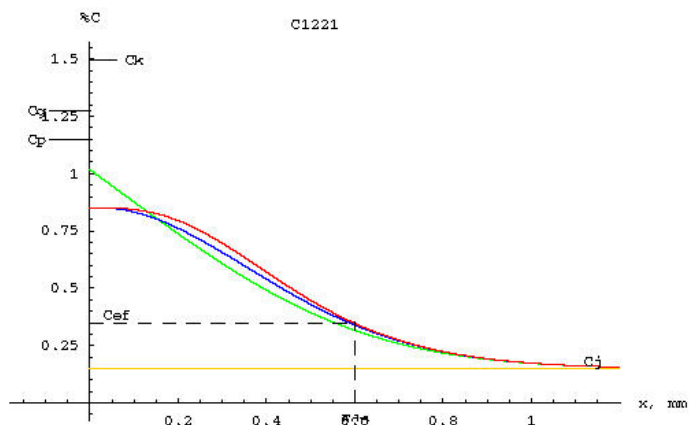
temperatura, [C]	930
temperatura_2, [C]	830
f1, faktor Cg i Ck	0.90
f2, faktor Cp2	0.90
f3, faktor dubine	0.97
Cef %	0.35
Edp, mm	0.60

Max. vrijeme 250 min

Start Izlaz

Rezultati

Cp [%C]	Cr [%C]	E [mV]	I [%Co2]	Tr [%C]	t [min]
1.14597	1.01668	1141.89	0.18854	-1.30492	84
0.8	0.849938	1123.39	0.26875	3.09917	46
0.85	0.849996	1082.3	1.1272	20.7399	121
					251

Slika 38. Pouglijčavanje Č1221, uz $f_1=0,9$, $f_2=0,9$, $f_3=0,97$, $Edp=0,60$, uz trajanje procesa od 250 minuta

POUGLJICAVANJE

%C	0.15
%Si	0.25
%Mn	0.45
%Cr	0
%Mo	0
%V	0
%Ni	0
%W	0

CELIK **C1221**

Atmosfera

- ☒ Carbomaag
- ☐ propan
- ☐ metan

temperatura, [C]	930
temperatura_2, [C]	830
f1, faktor Cg i Ck	0.90
f2, faktor Cp2	0.90
f3, faktor dubine	0.97
Cef %	0.35
Edp, mm	0.60

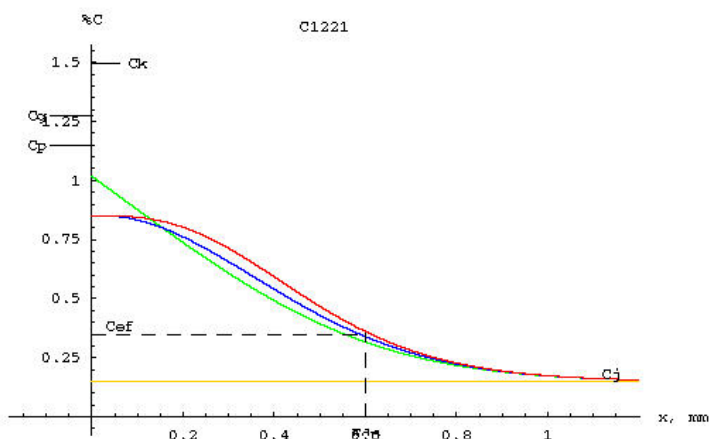
Max. vrijeme **300** min

Start

Izlaz

Rezultati

Cp [%C]	Cr [%C]	E [mV]	I [%Co2]	Tr [%C]	t [min]
1.14597	1.01668	1141.89	0.18854	-1.30492	84
-	-	-	-	-	-
0.8	0.849938	1123.39	0.26875	3.09917	46
0.85	0.849997	1082.3	1.1272	20.7399	171
					301



Slika 39. Pougljičavanje Č1221, uz $f_1=0,9$, $f_2=0,9$, $f_3=0,97$, $Edp=0,60$, uz trajanje procesa od 300 minuta

Prilikom analize procesa, a što je vidljivo i iz tijekova ugljika u primjerima slika 36 - slika 39, ustanovljeno je da se u završnom stupnju procesa, pri sniženoj temperaturi i C-potencijalu, na "ispravljanje" toka ugljika troši puno vremena, koje je često nerazmjerno veliko u trajanju ukupnog procesa. Stoga je u program ugrađena mogućnost vremenskog ograničenja, čime se dobiva mogućnost ocjene dobivenog profila ugljika nakon završenog procesa te mogućnost analize prikladnosti procesa za željenu namjenu. Time se mogu utvrditi optimalni parametri za dobro upravljanje tehnološkom procesom.

Primjeri za još neke čelike i režime pougljičavanja:

POUGLIJAVANJE

%C	0.15
%Si	0.25
%Mn	0.45
%Cr	0
%Mo	0
%V	0
%Ni	0
%W	0

CELIK **C1221**

Atmosfera

- ☒ Carbomaag
☐ propan
☐ metan

temperatura, [C]	930
temperatura_2, [C]	830
f1, faktor Cg i Ck	0.90
f2, faktor Cp2	0.90
f3, faktor dubine	0.98
Cef %	0.35
Edp, mm	0.80

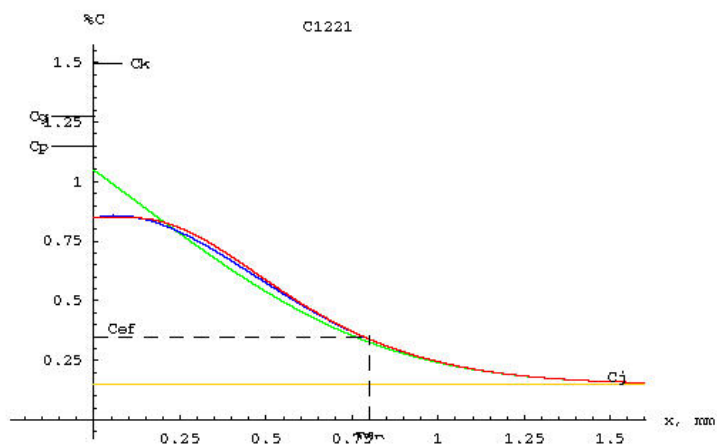
Max. vrijeme 330 min

Start

Izlaz

Rezultati

Cp [%C]	Cr [%C]	E [mV]	I [%Co2]	Tr [%C]	t [min]
1.14597	1.04811	1141.89	0.18854	-1.30492	145
0.8	0.84986	1123.39	0.26875	3.09917	62
0.85	0.849991	1082.3	1.1272	20.7399	124
					331



Slika 40. Pougljičavanje Č1221 , uz $f_1=0,9$, $f_2=0,9$, $f_3=0,98$, $Edp=0,80$, uz trajanje procesa od 330 minuta

POUGLIJAVANJE

%C	0.16
%Si	0.3
%Mn	1.15
%Cr	0.95
%Mo	0
%V	0
%Ni	0
%W	0

CELIK **C4320**

Atmosfera

- ☒ Carbomaag
☐ propan
☐ metan

temperatura, [C]	930
temperatura_2, [C]	830
f1, faktor Cg i Ck	0.90
f2, faktor Cp2	0.90
f3, faktor dubine	0.98
Cef %	0.35
Edp, mm	0.80

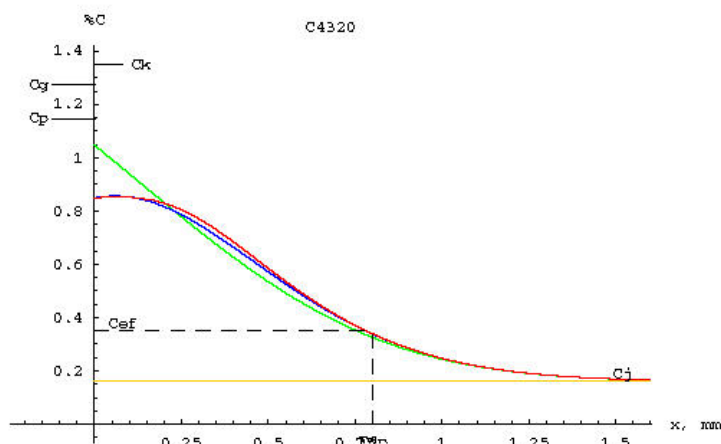
Max. vrijeme 330 min

Start

Izlaz

Rezultati

Cp [%C]	Cr [%C]	E [mV]	I [%Co2]	Tr [%C]	t [min]
1.14597	1.0471	1141.89	0.18854	-1.30492	140
0.8	0.849647	1123.39	0.26875	3.09917	62
0.85	0.849979	1082.3	1.1272	20.7399	129
					331



Slika 41. Pougljičavanje Č4320 , uz $f_1=0,9$, $f_2=0,9$, $f_3=0,98$, $Edp=0,80$, uz trajanje procesa od 330 minuta

POUGLIJICAVANJE

%C	0.17
%Si	0.3
%Mn	0.5
%Cr	1.95
%Mo	0
%V	0
%Ni	1.95
%W	0

CELIK C5421

Atmosfera

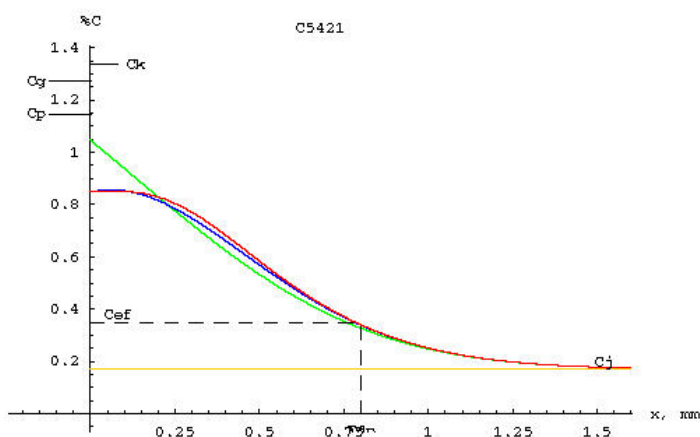
- ☒ Carbomaag
☐ propan
☐ metan

temperatura, [C]	930
temperatura_2, [C]	830
f1, faktor Cg i Ck	0.90
f2, faktor Cp2	0.90
f3, faktor dubine	0.98
Cef %	0.35
Edp, mm	0.80
Max. vrijeme	330 min

Start Izlaz

Rezultati

Cp [%C]	Cr [%C]	E [mV]	I [%Co2]	Tr [%C]	t [min]
1.14597	1.04641	1141.89	0.18854	-1.30492	136
0.8	0.84989	1123.39	0.26875	3.09917	61
0.85	0.849994	1082.3	1.1272	20.7399	134
					331



Slika 42. Pougljičavanje Č5421 , uz $f_1=0,9$, $f_2=0,9$, $f_3=0,98$, $Edp=0,80$, uz trajanje procesa od 330 minuta

POUGLIJICAVANJE

%C	0.15
%Si	0.25
%Mn	0.45
%Cr	0
%Mo	0
%V	0
%Ni	0
%W	0

CELIK C1221

Atmosfera

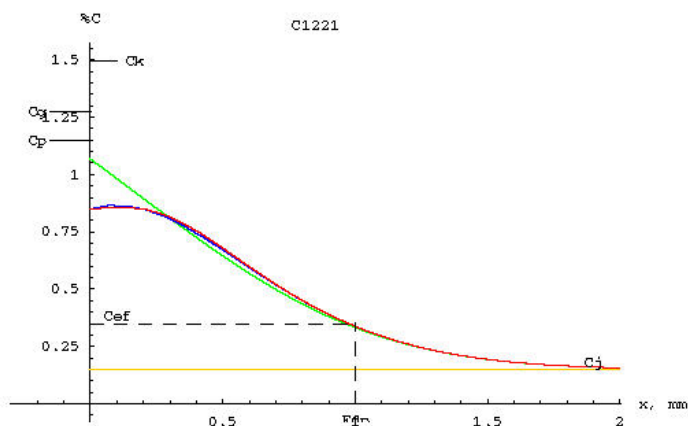
- ☒ Carbomaag
☐ propan
☐ metan

temperatura, [C]	930
temperatura_2, [C]	830
f1, faktor Cg i Ck	0.90
f2, faktor Cp2	0.90
f3, faktor dubine	0.99
Cef %	0.35
Edp, mm	1.0
Max. vrijeme	420 min

Start Izlaz

Rezultati

Cp [%C]	Cr [%C]	E [mV]	I [%Co2]	Tr [%C]	t [min]
1.14597	1.06735	1141.89	0.18854	-1.30492	223
0.8	0.849857	1123.39	0.26875	3.09917	73
0.85	0.849991	1082.3	1.1272	20.7399	125
					421



Slika 43. Pougljičavanje Č1221 , uz $f_1=0,9$, $f_2=0,9$, $f_3=0,99$, $Edp=1,00$, uz trajanje procesa od 420 minuta

POUGLJICAVANJE

%C	0.16
%Si	0.3
%Mn	1.15
%Cr	0.95
%Mo	0
%V	0
%Ni	0
%W	0

CELIK **C4320**

Atmosfera

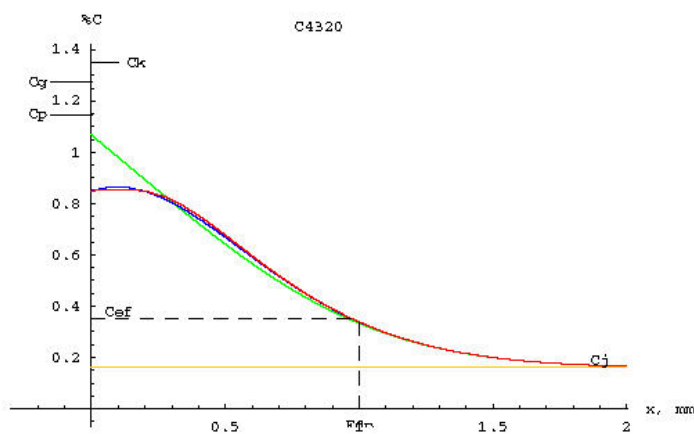
- ☒ Carbomaag
☐ propan
☐ metan

temperatura, [C]	930
temperatura_2, [C]	830
f1, faktor Cg i Ck	0.90
f2, faktor Cp2	0.90
f3, faktor dubine	0.99
Cef %	0.35
Edp, mm	1.0

Max. vrijeme 420 min

Rezultati

Cp [%C]	Cr [%C]	E [mV]	I [%Co2]	Tr [%C]	t [min]
1.14597	1.06668	1141.89	0.18854	-1.30492	216
-	-	-	-	-	-
0.8	0.849723	1123.39	0.26875	3.09917	73
0.85	0.849983	1082.3	1.1272	20.7399	132
					421



Slika 44. Pouglijčavanje Č4320 , uz $f_1=0,9$, $f_2=0,9$, $f_3=0,99$, $Edp=1,00$, uz trajanje procesa od 420 minuta

POUGLJICAVANJE

%C	0.17
%Si	0.3
%Mn	0.5
%Cr	1.95
%Mo	0
%V	0
%Ni	1.95
%W	0

CELIK **C5421**

Atmosfera

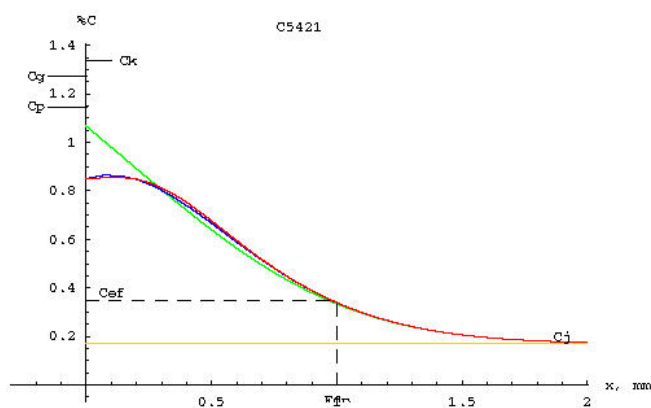
- ☒ Carbomaag
☐ propan
☐ metan

temperatura, [C]	930
temperatura_2, [C]	830
f1, faktor Cg i Ck	0.90
f2, faktor Cp2	0.90
f3, faktor dubine	0.99
Cef %	0.35
Edp, mm	1.0

Max. vrijeme 420 min

Rezultati

Cp [%C]	Cr [%C]	E [mV]	I [%Co2]	Tr [%C]	t [min]
1.14597	1.06615	1141.89	0.18854	-1.30492	210
-	-	-	-	-	-
0.8	0.849952	1123.39	0.26875	3.09917	72
0.85	0.849997	1082.3	1.1272	20.7399	139
					421



Slika 45. Pouglijčavanje Č5421 , uz $f_1=0,9$, $f_2=0,9$, $f_3=0,99$, $Edp=1,00$, uz trajanje procesa od 420 minuta

3 EKSPERIMENTALNI DIO

3.1 Pougljičavanje prije difuzijskog stvaranja karbida

Program za pougljičavanje prije difuzijskog stvaranja karbida služi za proračun količine ugljika koju treba unijeti prije pougljičavanja da nakon stvaranja karbida površina ne bi bila osiromašena ugljikom. Probe pougljičavanja provedene su radi utvrđivanja podudarnosti udjela ugljika nakon pougljičavanja dobivenih računalskim programom i udjela ugljika na eksperimentalno pougljičenim uzorcima.

Postupak pougljičavanja prije stvaranja karbida proveden je na dvama uzorcima: na alatnom čeliku za hladni rad Č3840 i na alatnom čeliku za topli rad Č4751.

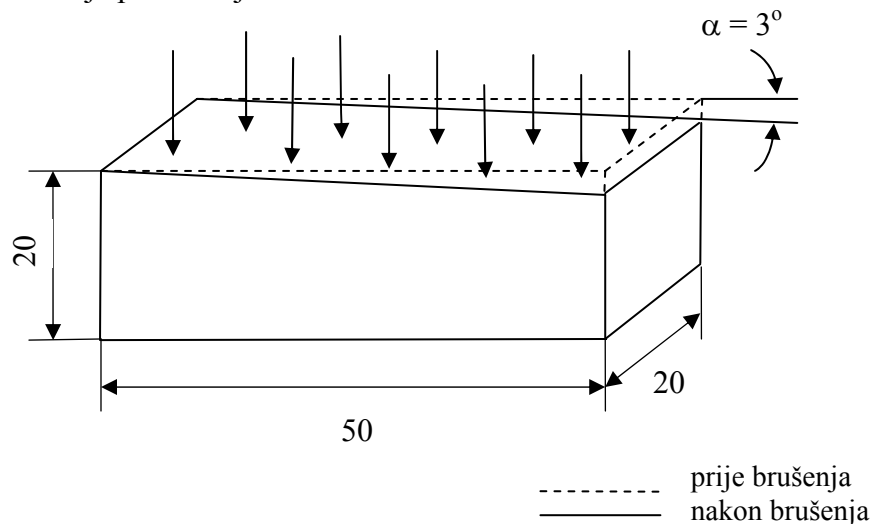
Uzorak od čelika Č3840 označen je oznakom "A".

Uzorak od čelika Č4751 označen je oznakom "B".

Uzorci su pougljičeni u poduzeću "Feroimpex" u liniji za pougljičavanje tip SOLO 207 80/110.

Uzorci su bili oblika prema slici 46.

Postupak pougljičavanja prikazan je na slici 47.



Slika 46. Uzorak za pougljičavanje prije stvaranja karbida

Površina pougljičenog uzorka na planskoj je brusilici skošena pod kutem od 3° , prema slici 46. Time su na raznim udaljenostima od bočne površine uzorka dobivene različite dubine pougljičenog sloja, a time i različiti udjeli ugljika. Zatim su izvršena mjerenja sadržaja ugljika

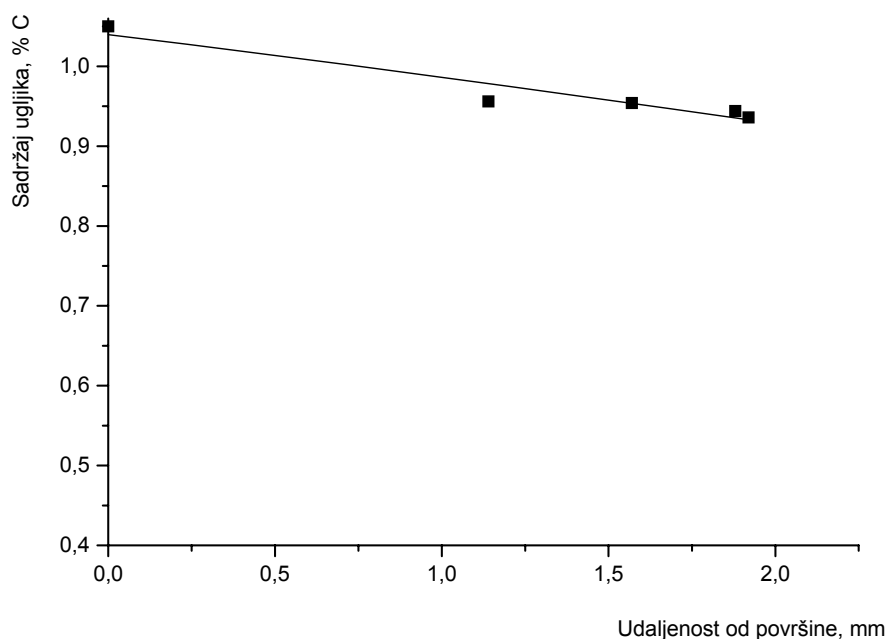
po skošenoj površini, u više točaka, prema strelicama na slici 46, spektrometrom SPECTRUMAT T-750 u Laboratoriju za analizu metala Zavoda za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Na profil projektoru izmjerene su udaljenosti od bočne površine na kojima su izmjereni sadržaji ugljika te su na temelju tih podataka izračunate dubine na kojima je sadržaj ugljika izmjeren. Tako su dobiveni sadržaji ugljika u ovisnosti o dubini pougljičavanja.

Pougljičeni su uzorci A od Č3840 i B od Č4751. Postupak pougljičavanja prikazan je dijagramom postupka s peći za pougljičavanje, Prilog 3.

Spektrometarskom analizom uzorka A nakon provedenog postupka dobiveni su sadržaji ugljika kao što je prikazano u Tablici 2.

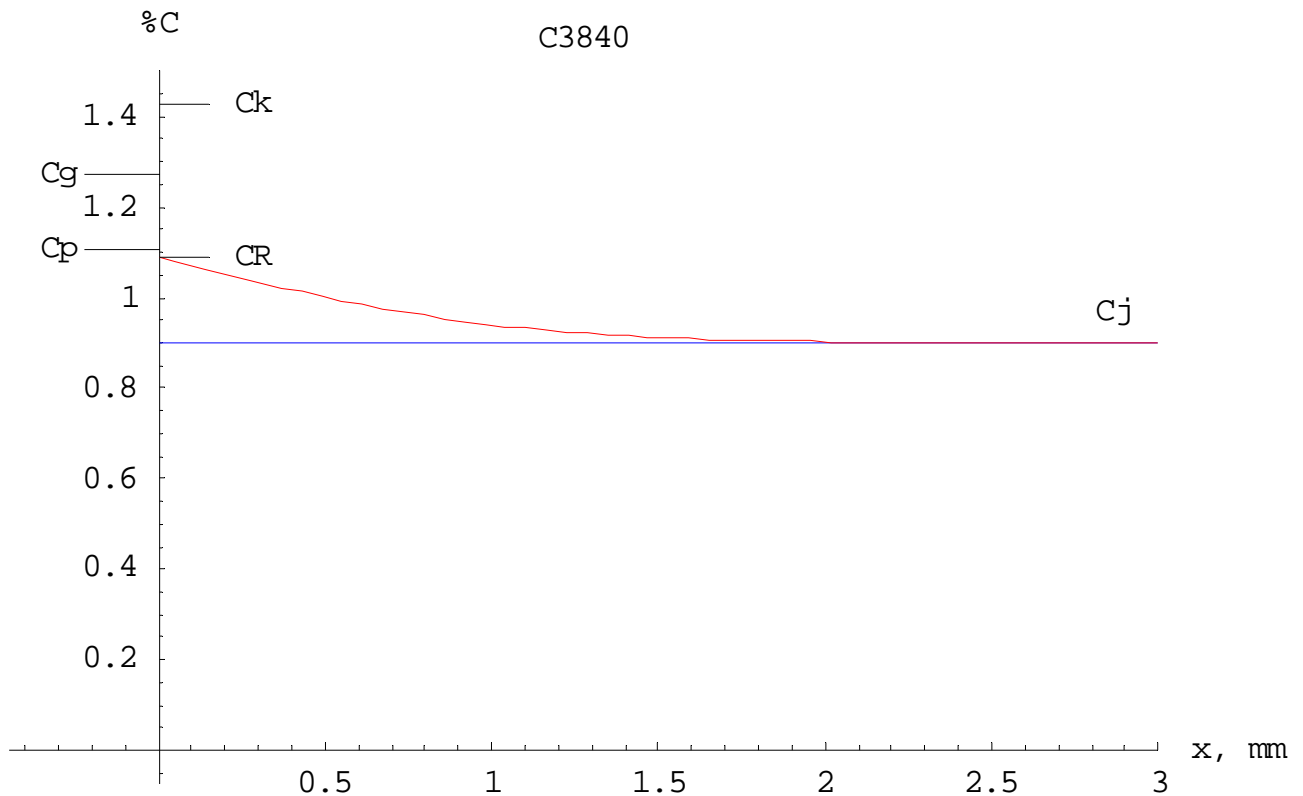
Tablica 2. Sadržaj ugljika u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak A, Č3840

udaljenost od površine, mm	sadržaj ugljika, % C
0	1,05
1,14	0,956
1,57	0,954
1,88	0,944
1,92	0,936



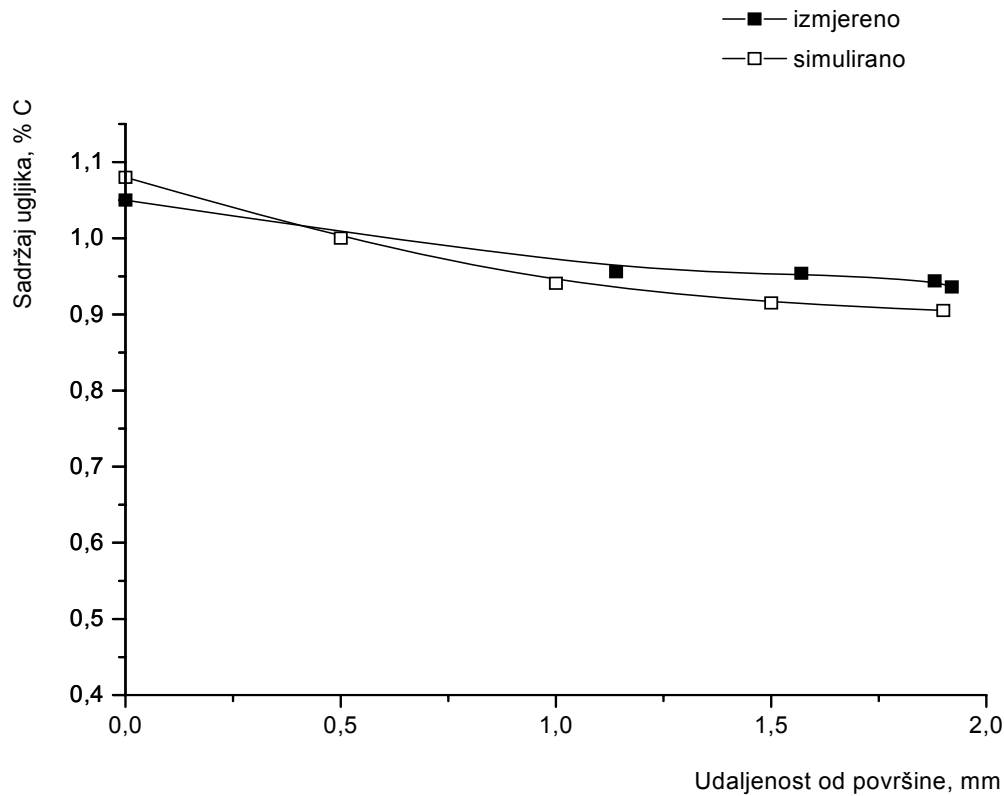
Slika 47. Prikaz izmjerenog toka ugljika nakon pougljičavanja, uzorak A, Č3840

Simulacijom postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu dobiven je tok ugljika kao na slici 48.



Slika 48. Dijagram toka ugljika u čeliku kod simulacija postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu (dio za pougljičavanje prije stvaranja karbida), uzorak A, Č3840 uz $C_{p1} = 1,10$, $T_1 = 930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 845\text{ }^{\circ}\text{C}$

Unošenjem sadržaja ugljika dobivenih mjerenjem nakon postupka pougljičavanja i sadržaja ugljika dobivenih simuliranjem procesa pougljičavanja u vlastitom računalskom programu u ovisnosti o udaljenosti od površine dobiva se dijagram koji je prikazan na slici 49.



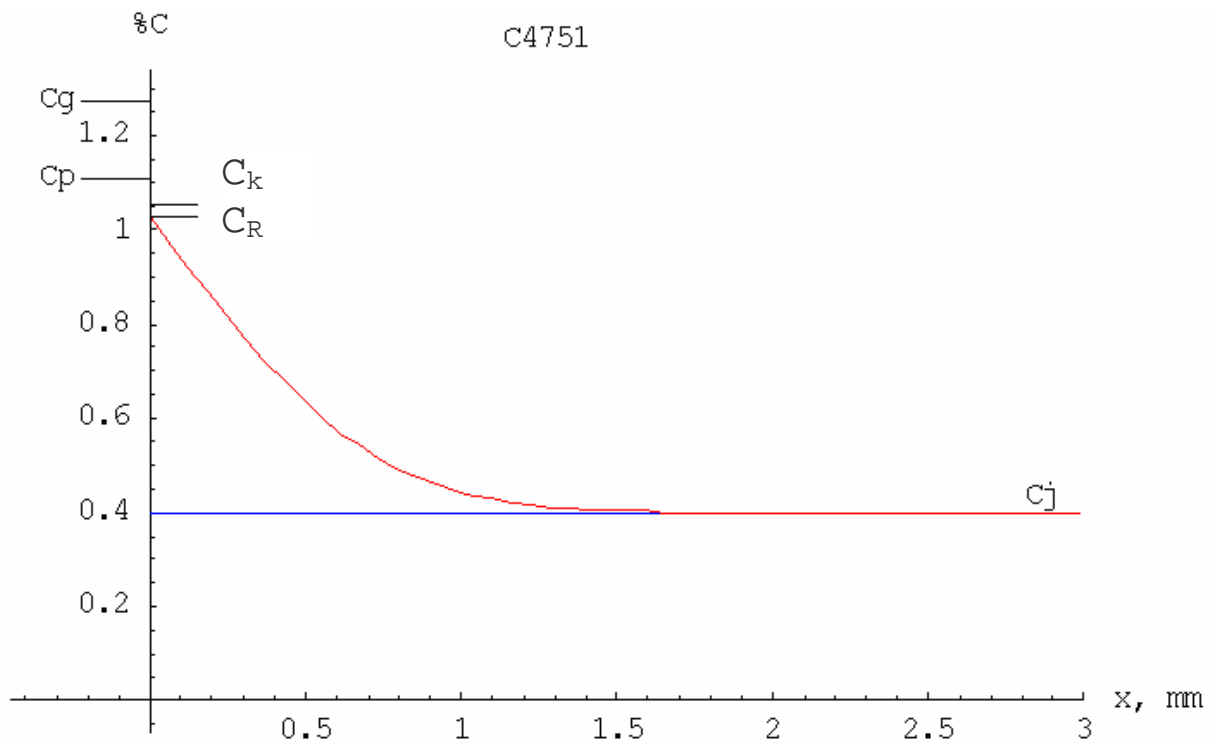
Slika 49. Usporedbeni prikaz izmjerenog toka ugljika i toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu, uzorak A, Č 3840, $C_p = 1,10$, $T_1 = 930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 845\text{ }^{\circ}\text{C}$

Spektrometarskom analizom uzorka B, Č4751, nakon provedenog postupka pougljičavanja prema slici u Prilogu 3 izmjereni su sadržaji ugljika kao što je prikazano u Tablici 3.

Tablica 3. Sadržaj ugljika u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak B, Č 4751

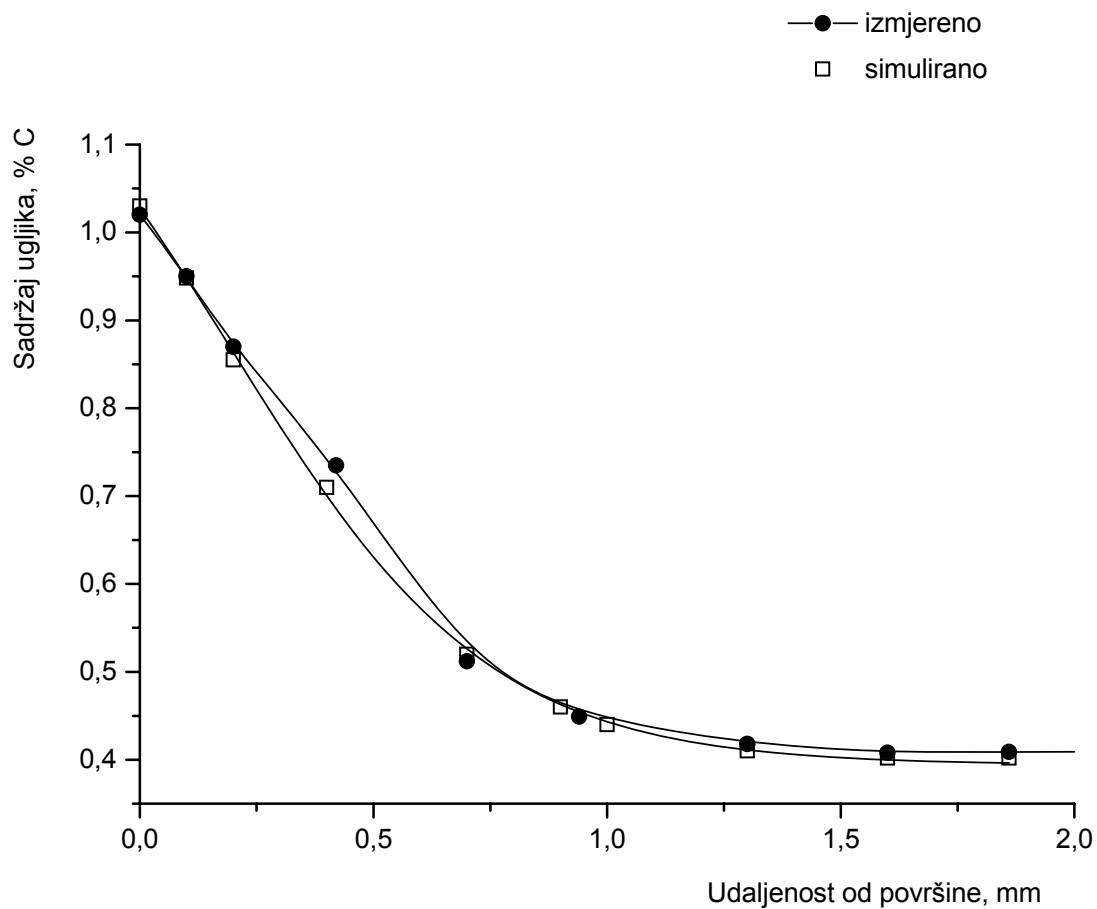
udaljenost od površine, mm	sadržaj ugljika, % C
0	1,020
0,1	0,950
0,2	0,870
0,42	0,735
0,7	0,512
0,94	0,449
1,3	0,418
1,6	0,408
1,86	0,409
2,1	0,409

Simulacijom postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu dobiven je sljedeći tok pougljičavanja:



Slika 50. Dijagram toka ugljika u čeliku kod simulacije postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu (dio za pougljičavanje prije stvaranja karbida), uzorak B, Č4751 uz $C_p = 1,10$, $T_1 = 930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 845\text{ }^{\circ}\text{C}$

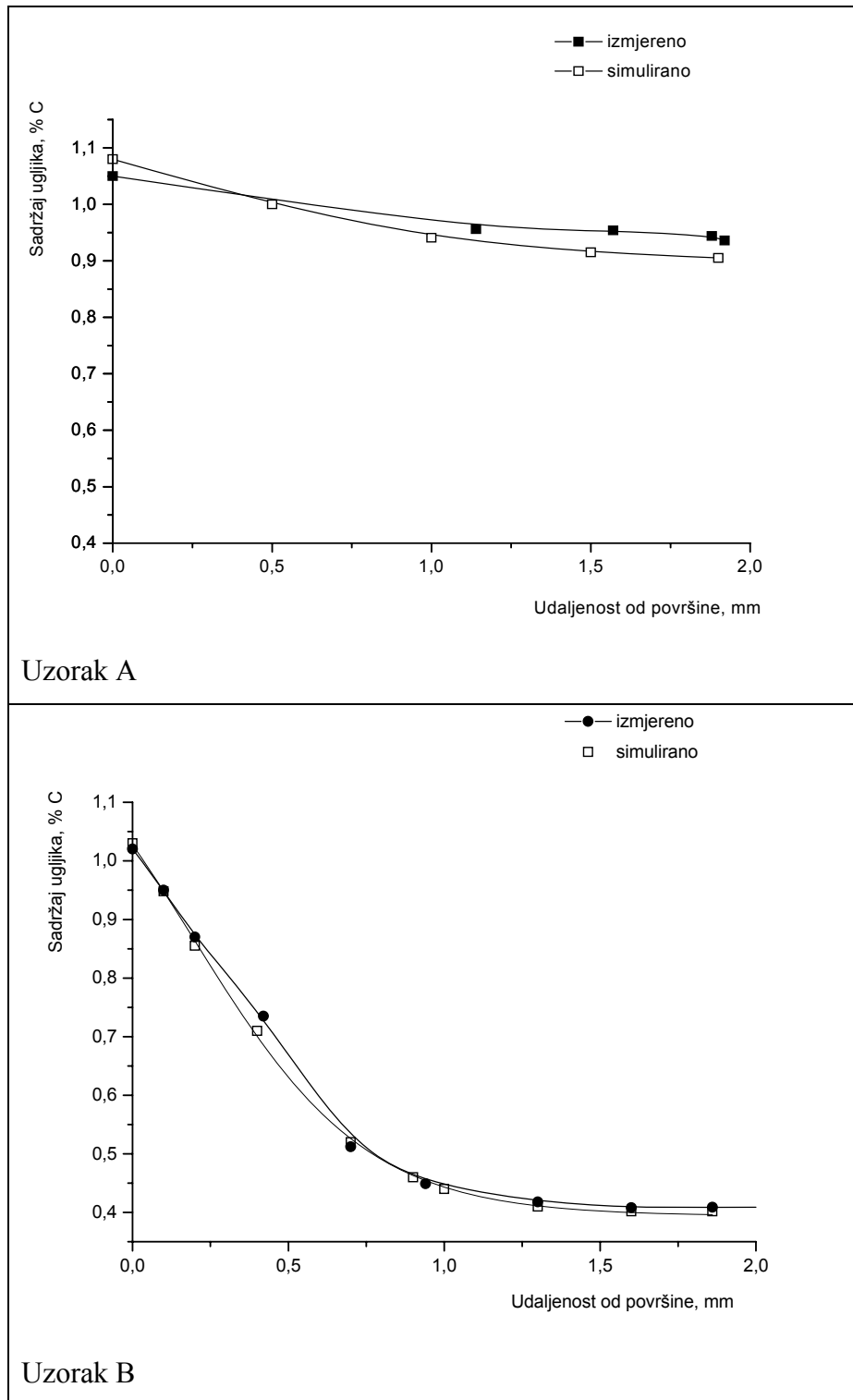
Unošenjem sadržaja ugljika dobivenih mjerenjem i sadržaja ugljika dobivenih simuliranjem procesa dobiva se dijagram koji je prikazan na slici 51.



Slika 51. Usporedbeni prikaz izmjerenog toka ugljika i toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu, uzorak B, Č 4751, $C_p = 1,10$, $T_1 = 930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 845\text{ }^{\circ}\text{C}$

Stvarni je proces vođen različito od simuliranog procesa, jer je stvarni tehnološki proces koji je prikazan na dijagramu u Prilogu 3 bio proces pougljičavanja s dvama različitim potencijalima, dok se proces pougljičavanja prije stvaranja karbida odvija s jednim C-potencijalom. Realni je tehnološki proces trajao 370 minuta (s time da je faza s maksimalnim C-potencijalom, $C_p = 1,10$, tj. prva faza, trajala 250 minuta), a simuliranje je izvršeno za trajanje procesa od 270 minuta (koje, uzevši u obzir C-potencijale, približno odgovara trajanju stvarnog procesa) uz maksimalni $C_p = 1,10$. Slične su aproksimacije primijenjene i kod ostalih simuliranja ostalih tehnoloških postupaka.

3.1.1 Analiza eksperimentalnih rezultata kod pougljičavanja prije stvaranja karbida



Slika 52. Prikaz izmjerenih i simuliranih tokova ugljika za uzorke A, B

Na dijagramu na slici 52 vidljiva je vrlo dobra podudarnost profila izmjerenog ugljika i profila dobivenog simuliranjem postupka pougljičavanja.

3.2 Pougljičavanje u sklopu postupka cementiranja

Svrha izrade programa za pougljičavanje u sklopu postupka cementiranja jest utvrđivanje optimalnog trajanja postupka te C-potencijala koji će dati željeni konačni sadržaj ugljika. Pritom, za razliku od postupka pougljičavanja prije stvaranja karbida, vrijednost C-potencijala kod ovoga postupka ne ostaje konstantnom već se mijenja prema fazama pougljičavanja, tako da se željeni profil sadržaja ugljika dobije uz najmanje moguće trajanje postupka i uz najmanji mogući utrošak ugljika.

Probe su pougljičene u četiri različite šarže, s različitim tehnološkim parametrima postupaka.

Nakon provedenih postupaka cementiranja, izvršena je kontrola dobivenih sadržaja ugljika i/ili postignutih mikrotvrdoća u ovisnosti o udaljenosti od površine.

Uzorci su označeni kako slijedi, ovisno o slijedu pokusa:

Uzorak od Č4320 pougljičen tehnološkim postupkom u kojemu je bilo zahtijevano

Edp = 1,6 mm - uzorak C

Uzorak od Č4320 pougljičen tehnološkim postupkom u kojemu je bilo zahtijevano

Edp = 0,60 mm - uzorak D

Uzorak od Č4320, pougljičen tehnološkim postupkom u kojemu je bilo zahtijevano

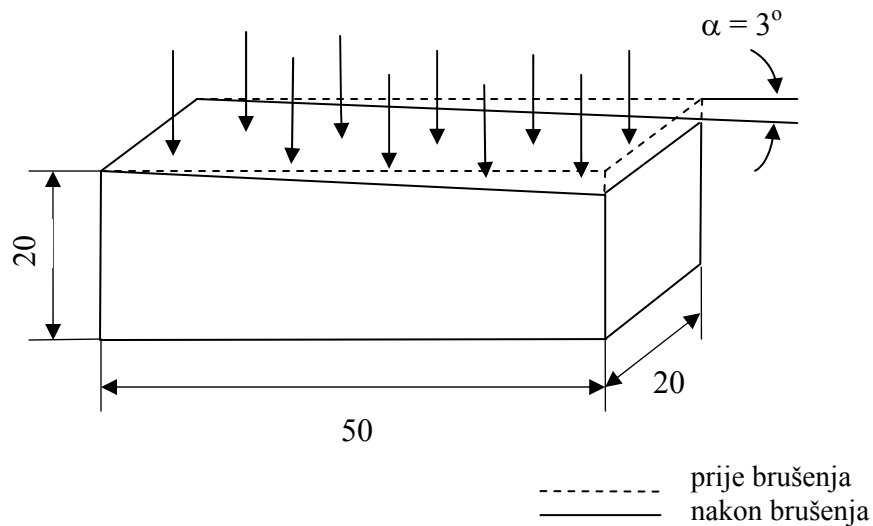
Edp = 0,80 mm - uzorak E

Uzorak od Č5421, pougljičen tehnološkim postupkom u kojemu je bilo zahtijevano

Edp = 0,80 mm - uzorak F

Uzorci su pougljičeni u poduzeću "Feroimpex" u liniji za pougljičavanje tip SOLO 207 80/110.

Uzorci su bili oblika prema slici 53.



Slika 53. Uzorak za pougljičavanje u sklopu postupka cementiranja

Površina pougljičenog uzorka na planskoj je brusilici skošena pod kutem od 3° , prema slici 53. Time su na raznim udaljenostima od bočne površine uzorka dobivene različite dubine pougljičenog sloja, a time i različiti udjeli ugljika. Zatim su izvršena mjerenja sadržaja ugljika po skošenoj površini, u više točaka, prema strelicama na slici 53, spektrometrom SPECTRUMAT T-750 u Laboratoriju za analizu metala Zavoda za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Na profil projektoru izmjerene su udaljenosti od bočne površine na kojima su izmjereni sadržaji ugljika te su na temelju tih podataka izračunate dubine na kojima je sadržaj ugljika izmjeren. Tako su dobiveni sadržaji ugljika u ovisnosti o dubini pougljičavanja.

Mikrotvrdoća je izmjerena mikrotvrdomerima Instron-TUCON 2000 na Katedri za toplinsku obradu Zavoda za materijale i ZWICK tip 3212001, Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava, B3/207/3, Zavoda za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, prema normi DIN EN ISO 6507-1, metodom Vickers HV1.

Pougličavanje uzorka C

Proces pougličavanja uzorka C, Č4320, prikazan je na slici u Prilogu 4.

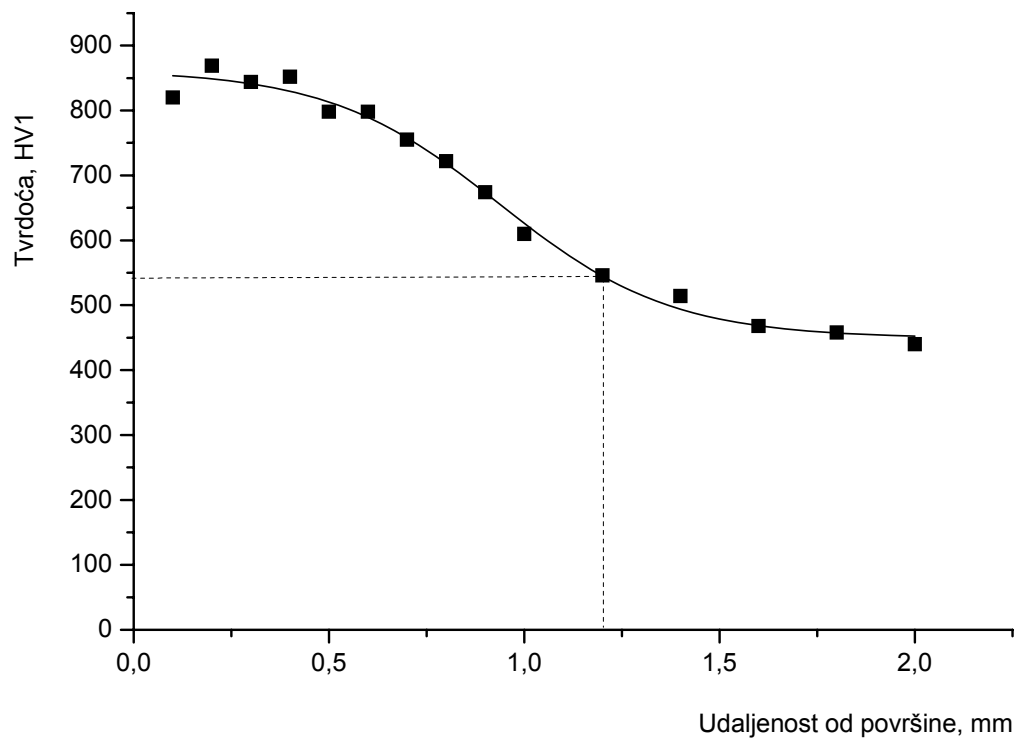
Na uzorku C izmjerena je mikrotvrdoća, HV1, Tablica 4

Tablica 4. Tvrdoća pougličanog uzorka u površinskom sloju u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak C, Č4320

udaljenost od površine, mm	mikrotvrdoća, HV1
820	0,1
869	0,2
844	0,3
852	0,4
798	0,5
798	0,6
755	0,7
722	0,8
674	0,9
610	1
546	1,2
514	1,4
468	1,6
458	1,8
440	2

Iz Tablice 4 zaključuje se da je efektivna dubina pougličavanja uzorka C, $E_{dp} = 1,2$ mm

Dijagram tvrdoće prikazan je na slici 54.

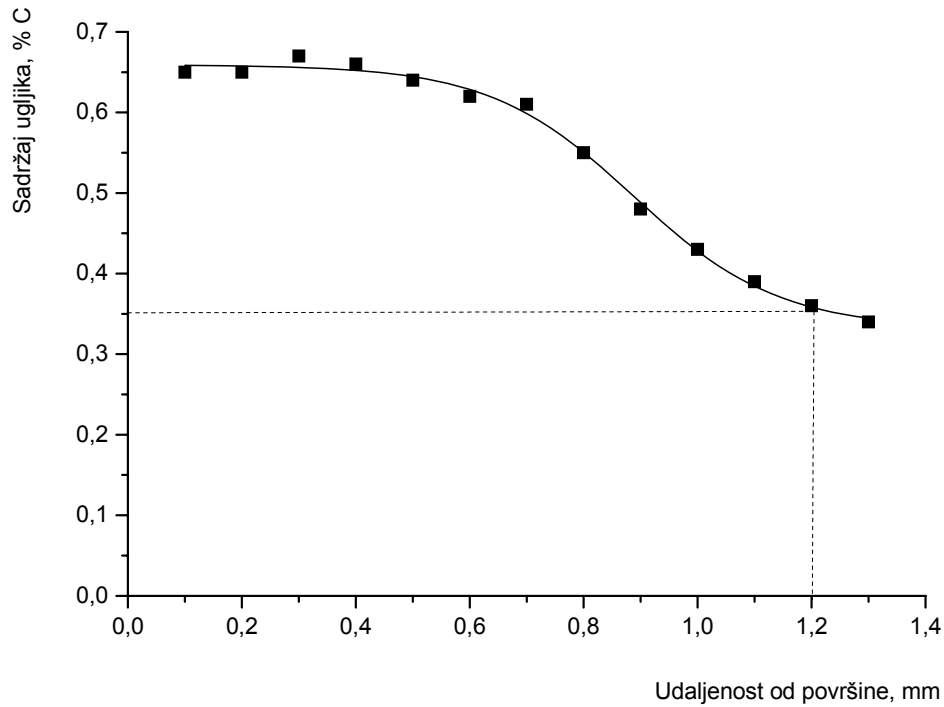


Slika 54. Dijagram izmjerenog toka tvrdoće, uzorak C, Č4320

Izvršena je spektrometerska analiza uzorka C te su izmjereni sadržaji ugljika u ovisnosti o udaljenosti od površine, Tablica 5.

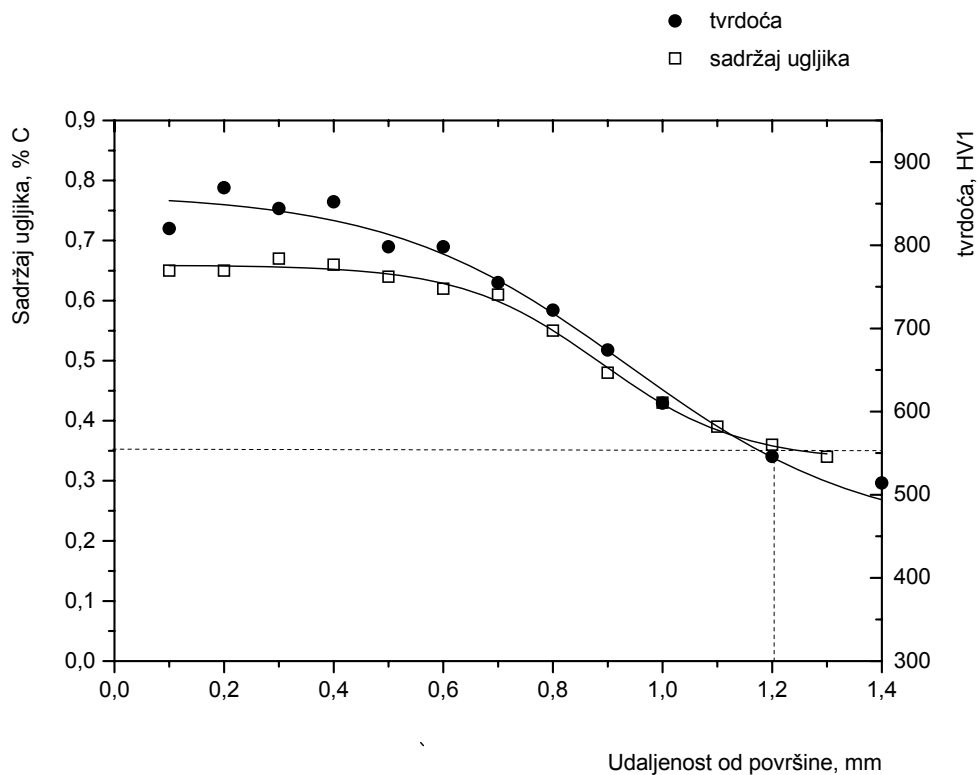
Tablica 5. Izmjereni sadržaj ugljika u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak C, Č4320

udaljenost od površine, mm	sadržaj ugljika, % C
0	0,65
0,1	0,65
0,15	0,67
0,25	0,66
0,4	0,64
0,45	0,62
0,6	0,61
0,7	0,55
0,9	0,48
1	0,43
1,1	0,39
1,2	0,36
1,3	0,34



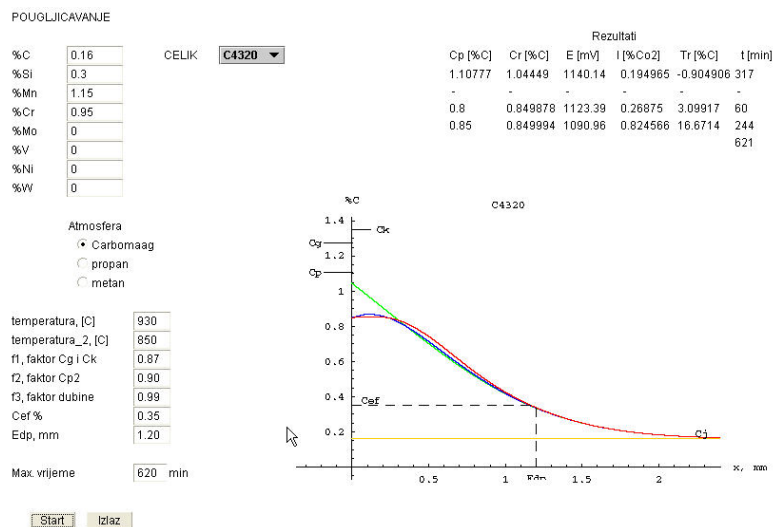
Slika 55. Dijagram izmjerenog toka ugljika, uzorak C, Č4320

Na slici 56 prikazane su izmjerene vrijednosti toka tvrdoće i sadržaja ugljika za uzorak C.



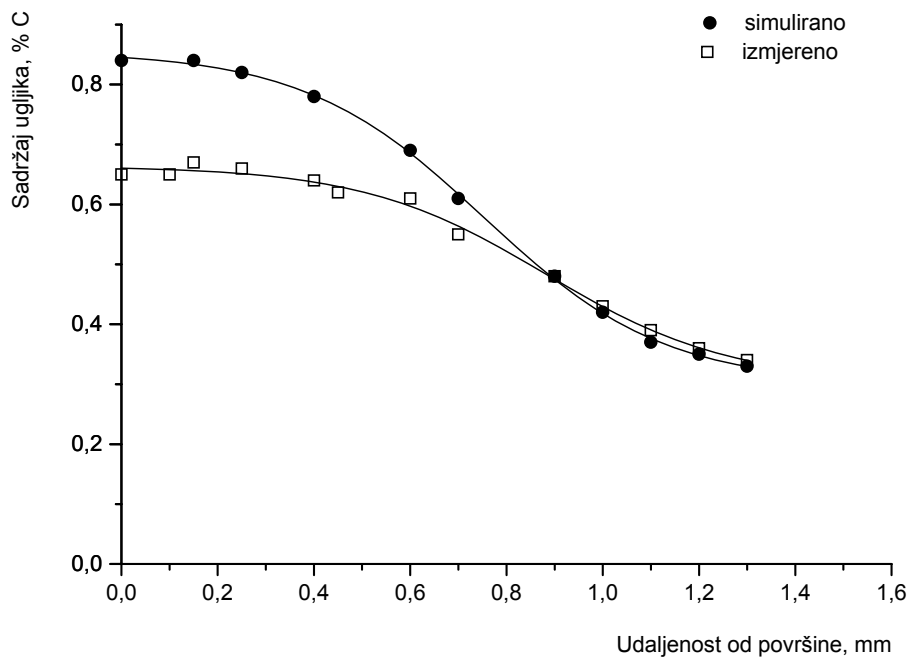
Slika 56. Dijagram izmjerenog toka tvrdoće i toka ugljika, uzorak C, Č4320

Radi dobivanja usporedbenih vrijednosti toka ugljika, a time i tvrdoće, postupak je simuliran kako je prikazano na slici 57, za $E_{dp}=1,20$ mm.



Slika 57. Završni ekran simuliranja postupka pougličavanja u vlastitom računalnom paketu, uzorak C, Č4320, na $E_{dp}=1,20$ mm, $C_{p1}=1,10$, $C_{p2}=0,80$, $C_{p3}=0,85$, uz zadani $C_R=0,80-0,85$, trajanje postupka 620 minuta.

Izmjereni i simulirani tok ugljika prikazani su na slici 58.



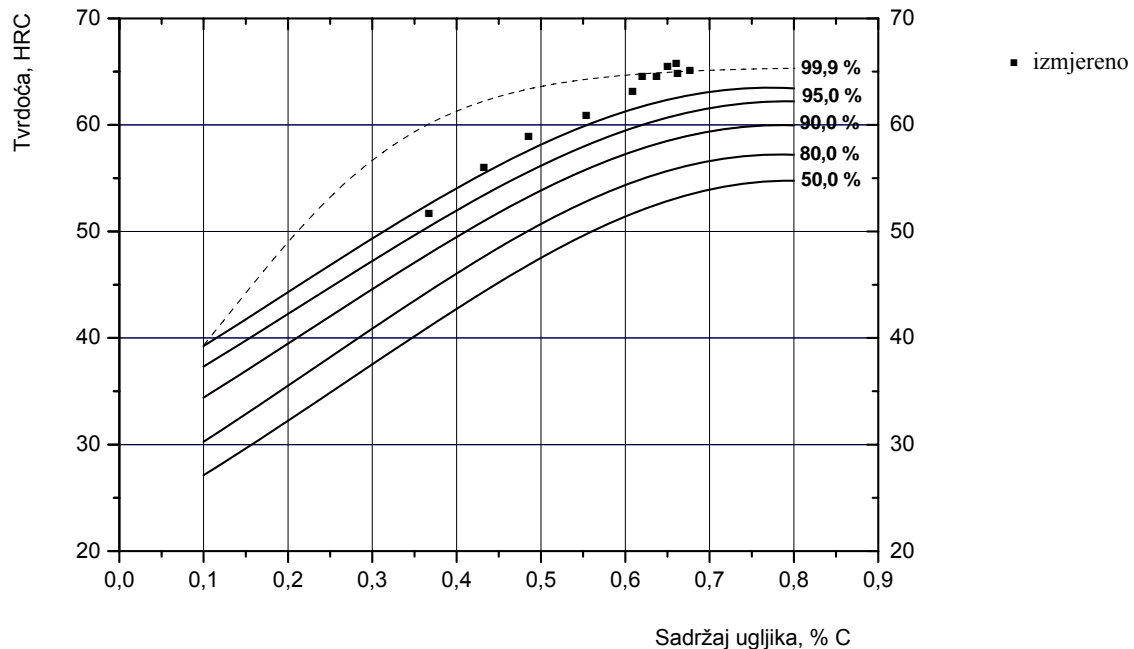
Slika 58. Usporedbeni prikaz izmjerenog toka ugljika i toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka pougličavanja u vlastitom računalnom programu, uzorak C, Č4320

Vrijednosti tvrdoće u HV preračunate su u HRC vrijednosti, jer se kod ovih postupaka tvrdoća često izražava u HRC. Preračunavanje je obavljeno prema Normi DIN 50150, vrijednosti su navedene u Tablici 6 te služe za orijentacijski prikaz, jer je opterećenje manje od HV30.

Tablica 6. Prikaz vrijednosti tvrdoće i sadržaja ugljika u Burns-ovom dijagramu, uzorak C, Č4320

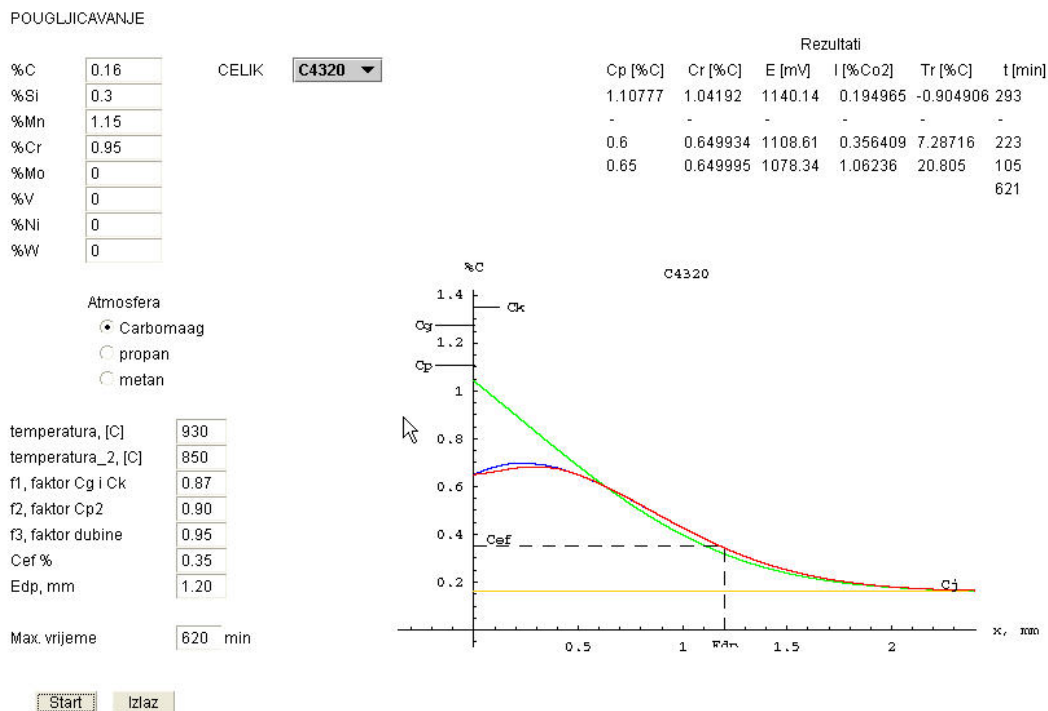
sadržaj ugljika, % C	mikrotvrdoća, HV1	tvrdoća, HRC
0,65	820	64,7
0,65	869	66,2
0,67	844	65,4
0,66	852	65,6
0,64	798	64,0
0,62	798	61,0
0,61	755	62,9
0,55	722	61,1
0,48	674	58,9
0,43	610	55,7
0,36	546	52,0

Izmjerene vrijednosti tvrdoće i sadržaja ugljika unesene su u Burns-ov dijagram.



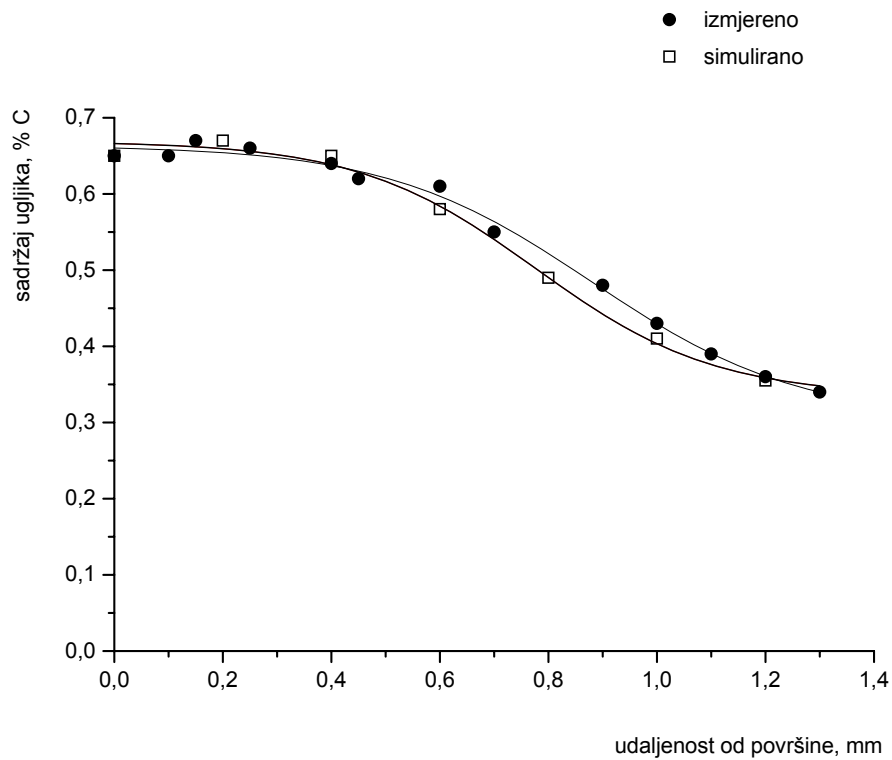
Slika 59. Prikaz vrijednosti tvrdoće i sadržaja ugljika u Burns-ovom dijagramu, uzorak C, Č4320

Uzme li se u obzir poremećaj difuzije kod ovoga postupka radi vjerojatnog taloženja čađe, radi čega je tijek ugljika bitno različit od simuliranoga u vlastitom računalskom programu, proces simuliranja može se provesti uz niži ciljani udjel ugljika, kao što je prikazano na slici 60.



Slika 60. Završni ekran simuliranja postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom paketu, uzorak C, Č4320, na $Edp=1,20$ mm, uz $Cp_1=1,10$, $Cp_2=0,60$, $Cp_2=0,65$, $T_1=930$ °C, $T_1=850$ °C uz $C_R=0,60-0,65$, trajanje postupka 620 minuta

Iz slike 60 vidljivo je da pougljičavanje u prvoj fazi postupka simuliranog računalskim programom uz ciljani rubni sadržaj ugljika od 0,65 nije ekonomično - pougljičavanjem uz najviši C-potencijal u prvoj fazi ne postiže se najveća moguća dubina.



Slika 61. Usporedbeni prikaz izmjerenog toka ugljika i toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu, uzorak C, Č4320, na $E_{dp}=1,20$ mm, uz $C_{p1}=1,10$, $C_{p2}=0,60$, $T_1=930$ °C, $T_2=850$ °C, uz $C_R=0,60-0,65$.

Pougljičavanje uzorka D

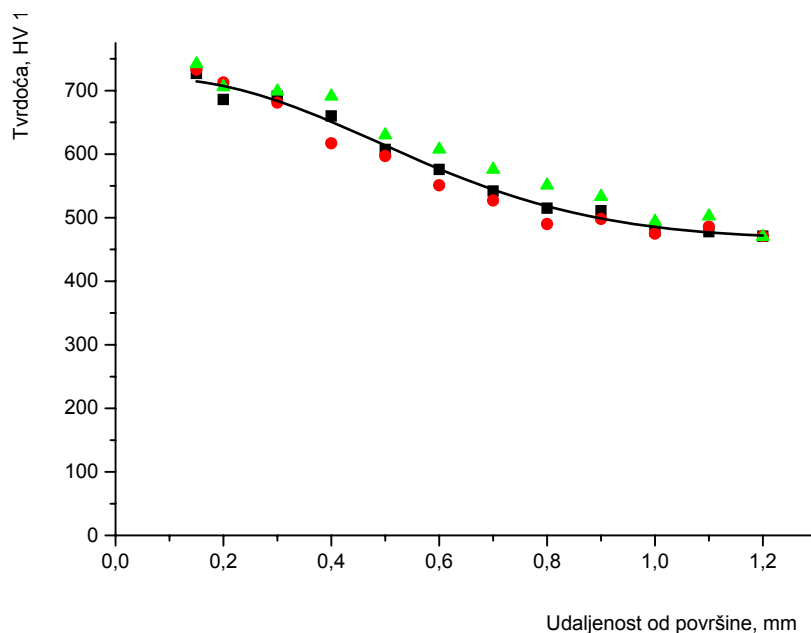
Uzorak D, od Č4320, pougljičen je režimom prema slici u Prilogu 5.

Nakon pougljičavanja izmjerena je mikrotvrdoća uzorka D, Tablica 7.

Tablica 7. Izmjerena mikrotvrdoća u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak D, Č4320

udaljenost od površine, mm	mikrotvrdoća, HV 1 niz I	mikrotvrdoća, HV 1 niz II	mikrotvrdoća, HV 1 niz III	prosječna mikrotvrdoća HV 1
0,15	727	733	742	734
0,2	686	713	706	702
0,3	691	681	699	690
0,4	660	617	691	656
0,5	607,5	597	630	611,5
0,6	576	551	607,5	578,2
0,7	542	527	576	548,3
0,8	515	490	551	518,7
0,9	511	498	533	514
1	479	475	494	482,7
1,1	478	486	502,5	488,8
1,2	471	471	470	470,7

Na slici 62 prikazani su tokovi tvrdoće svih triju izmjerenih nizova te srednja krivulja vrijednosti tvrdoća u ovisnosti o udaljenosti od površine.

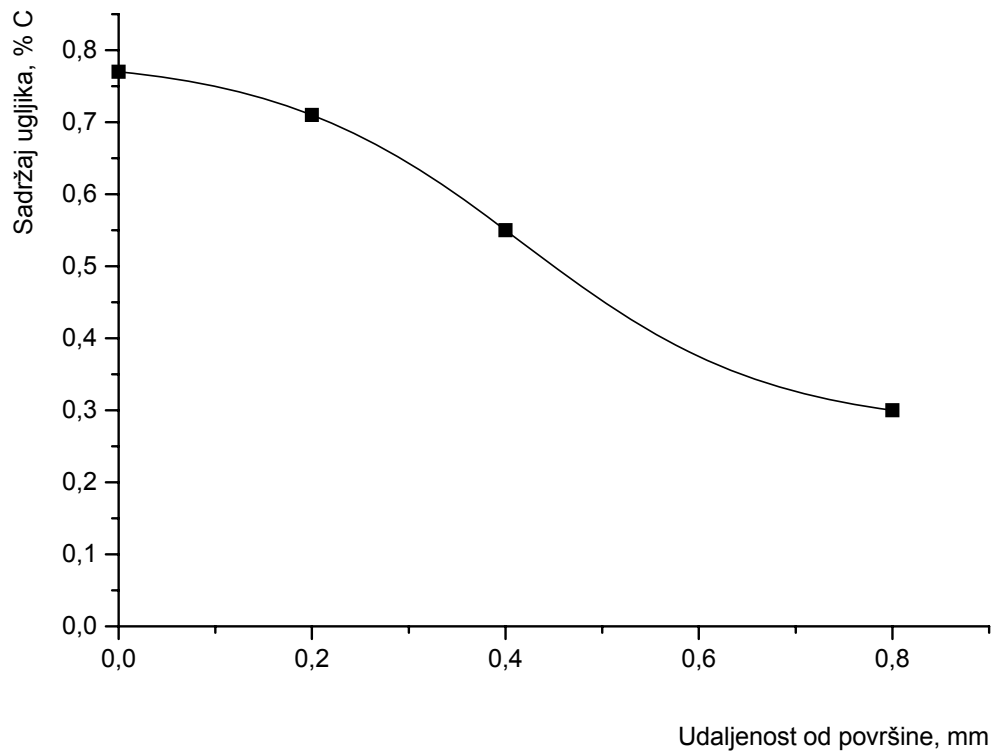


Slika 62. Dijagram izmjerenog toka mikrotvrdoće u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak D, Č4320

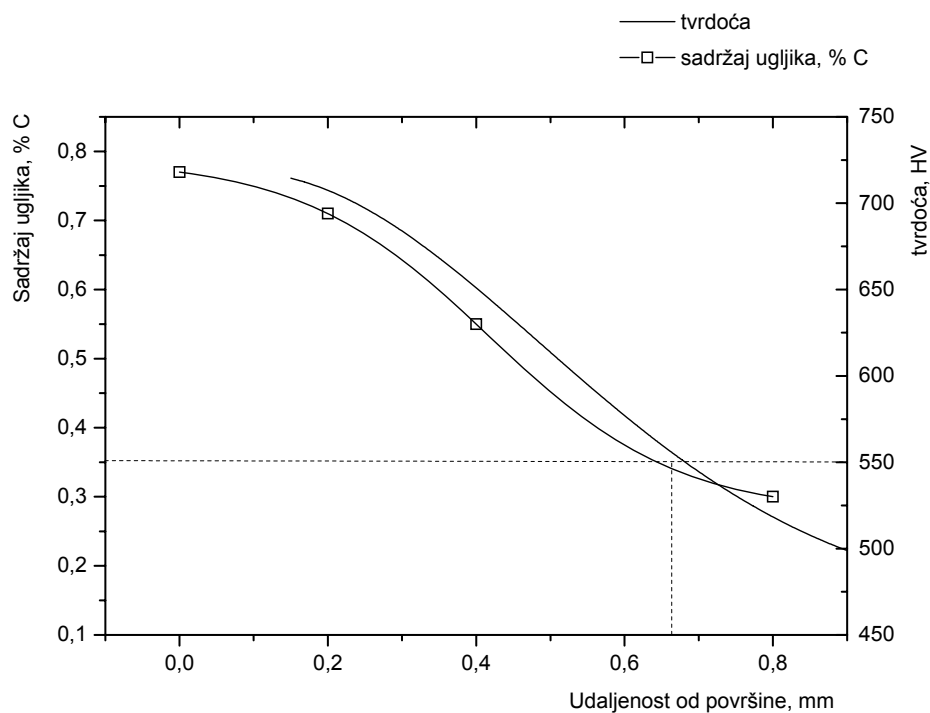
Izmjerene su vrijednosti sadržaja ugljika u ovisnosti o udaljenosti od površine, Tablica 8.

Tablica 8. Izmjereni sadržaj ugljika u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak D, Č4320

udaljenost od površine, mm	sadržaj ugljika, % C
0	0,77
0,2	0,71
0,4	0,55
0,8	0,3

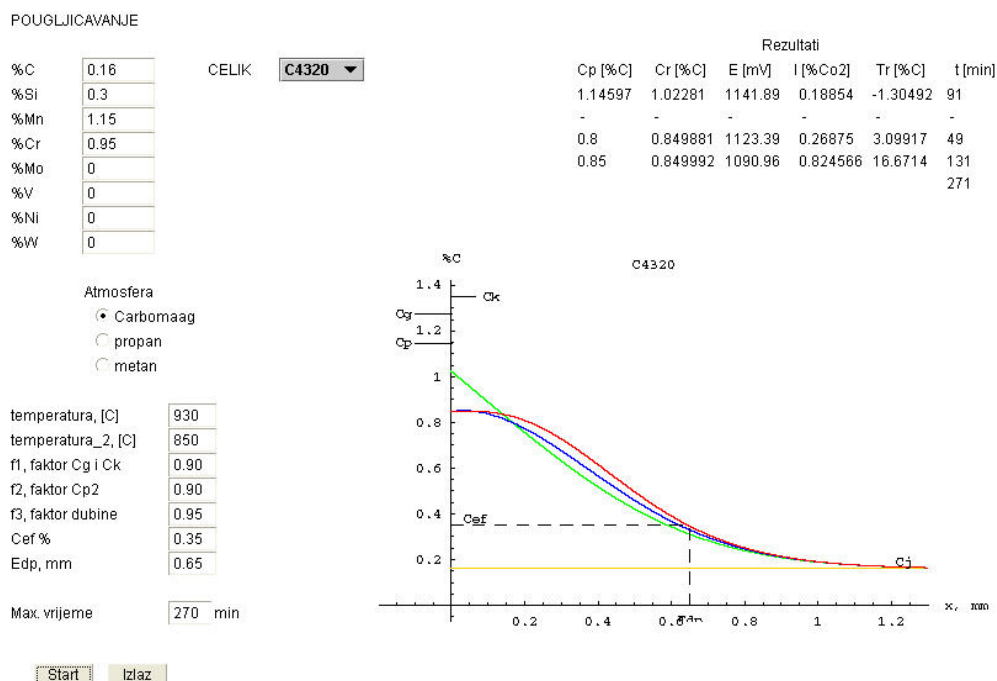


Slika 63. Dijagram izmjerenog toka ugljika, uzorak D, Č4320



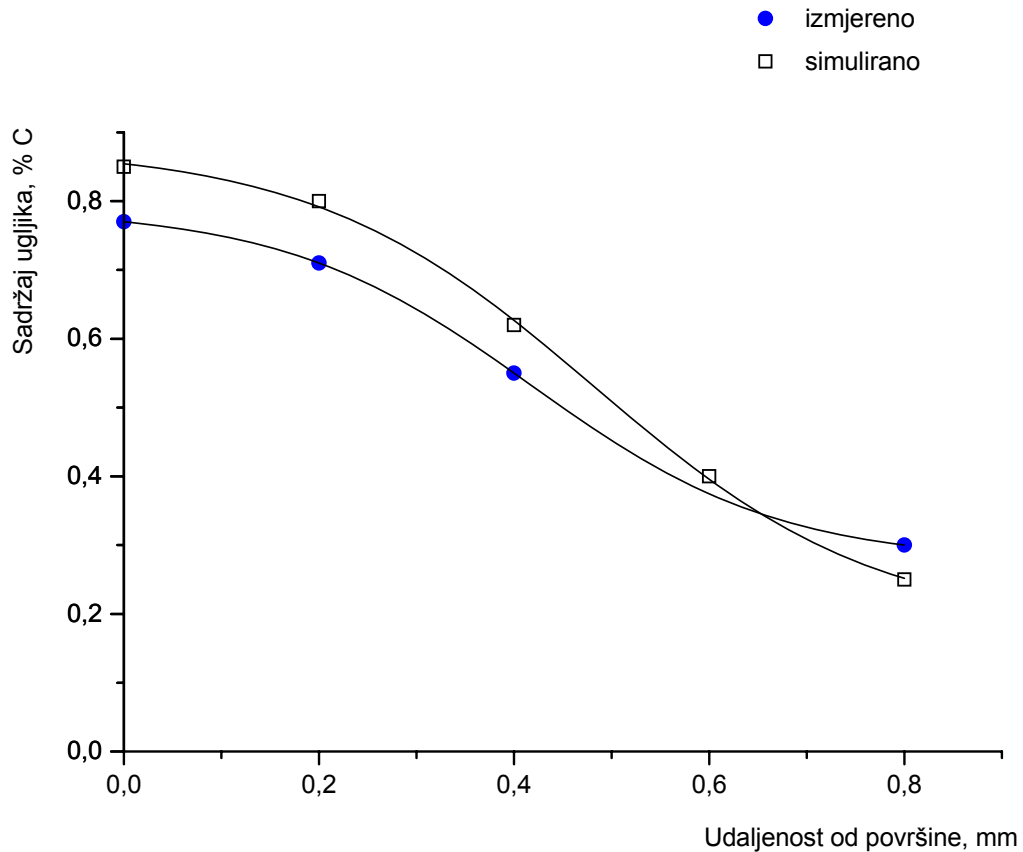
Slika 64. Dijagram izmjerene mikrotvrdoće i ugljika, uzorak D, Č4320

Obzirom na vrijednosti mikrotvrdoće i sadržaja ugljika prema dijagramu na slici 64, proces je za uzorak D, Č4320, simuliran za $E_{dp} = 0,65$ mm, slika 65.



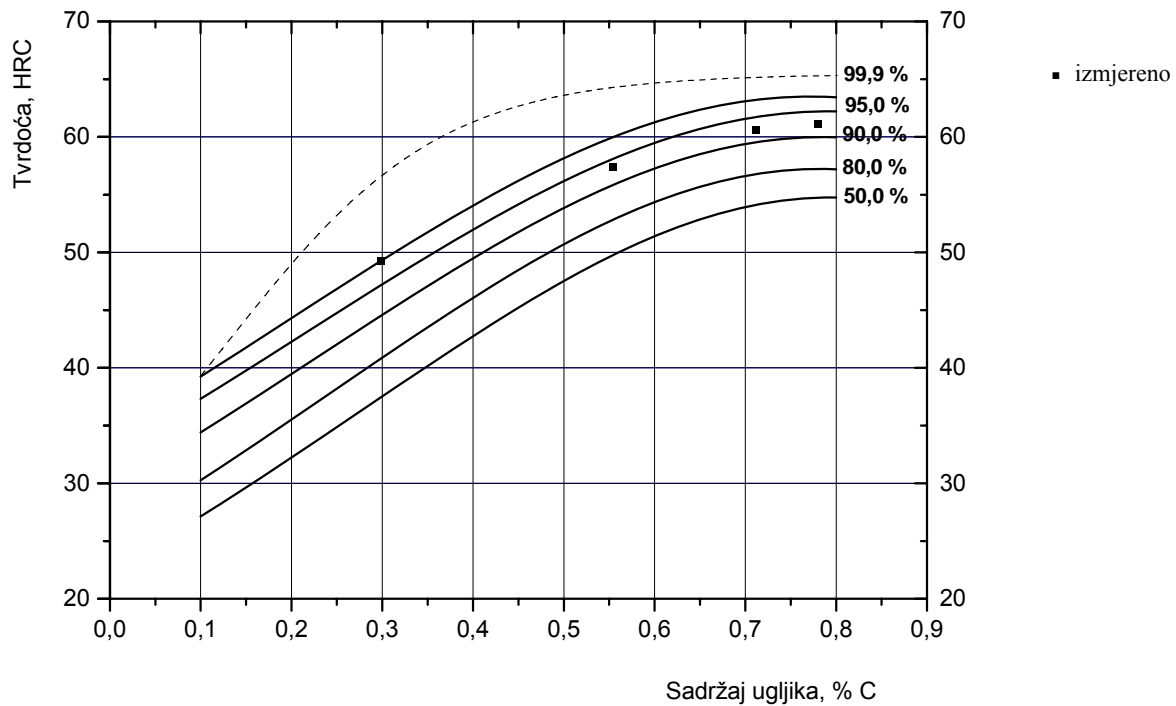
Slika 65. Završni ekran simuliranja postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu, uzorak D, Č4320, $C_{p1}=1,15$, $C_{p2}=0,8$, $C_{p3}=0,85$, $T_1=930$ °C, $T_2=850$ °C, $E_{dp} = 0,65$ mm, zadani $C_R = 0,8-0,85$

Usporedba izmjerenih sadržaja ugljika i sadržaja ugljika dobivenih simuliranjem u vlastitom računalskom programu, za $E_{dp}=0,65$ mm, prikazana je na slici 66.

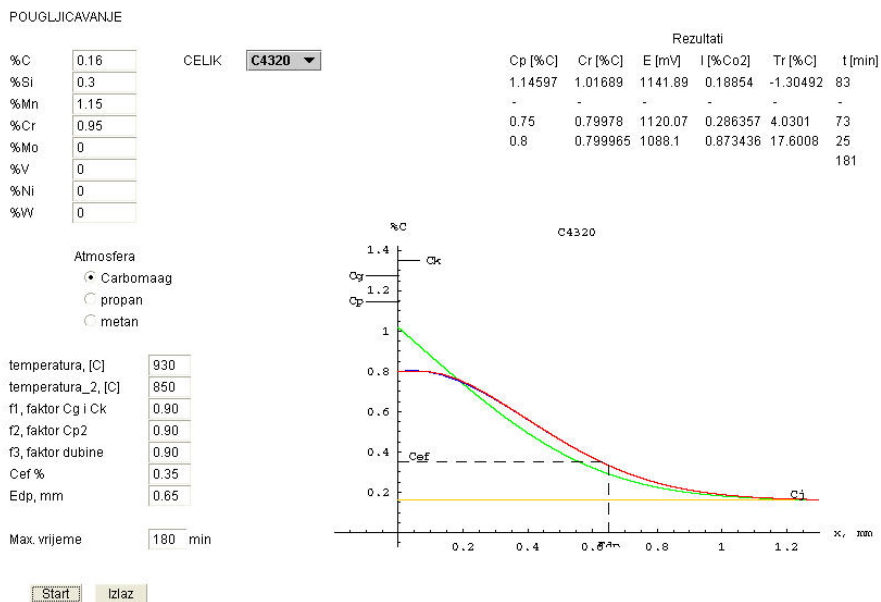


Slika 66. Usporedbeni prikaz izmjerenog toka ugljika i toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu, uzorak D, Č4320, $E_{dp}=0,65$, $C_p=1,15$, $T_1=930$ °C, $T_2=850$ °C

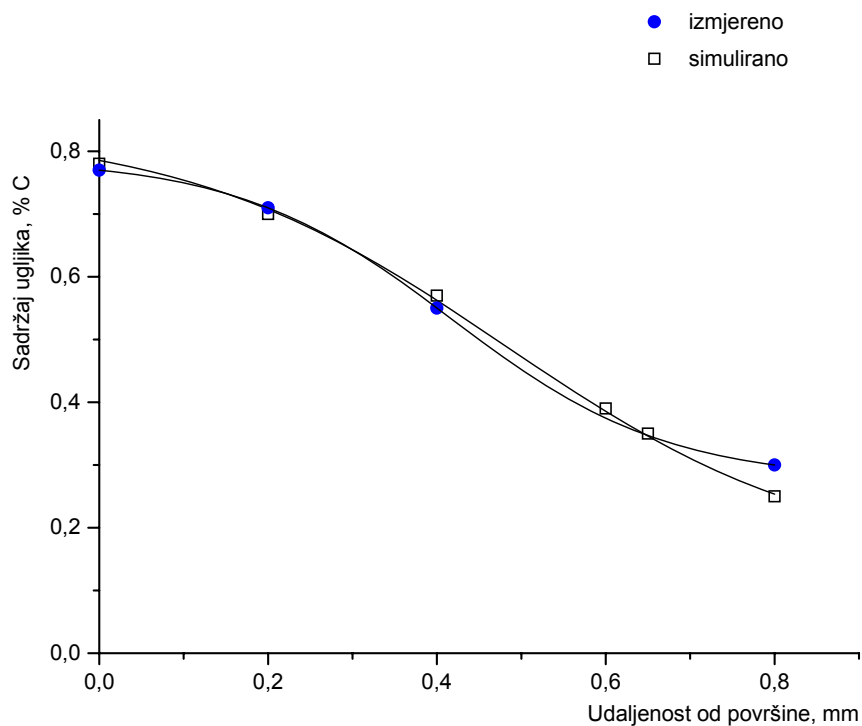
Vrijednosti tvrdoće i sadržaja ugljika unesene su u Burns-ov dijagram.



Slika 67. Prikaz vrijednosti tvrdoće i sadržaja ugljika u Burns-ovom dijagramu, uzorak D, Č4320



Slika 68. Završni ekran simuliranja postupka pougljičavanja u vlastitom računalском programu, uzorak D, Č4320, $C_{p1}=1,15$, $C_{p2}=0,75$, $C_{p2}=0,80$, $T_1=930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2=850\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Edp = 0,65\text{ mm.}$, uz $C_R=0,75-0,80$, trajanje 180 minuta



Slika 69. Usporedbeni prikaz izmjerenog toka ugljika i toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu, D , Č4320, $C_{p1}=1,15$, $C_{p2}=0,75$, $T_1=930\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2=850\text{ }^{\circ}\text{C}$, $E_{dp} = 0,65\text{ mm}$, uz $C_R = 0,75\text{--}0,80$

Pougličavanje uzorka E

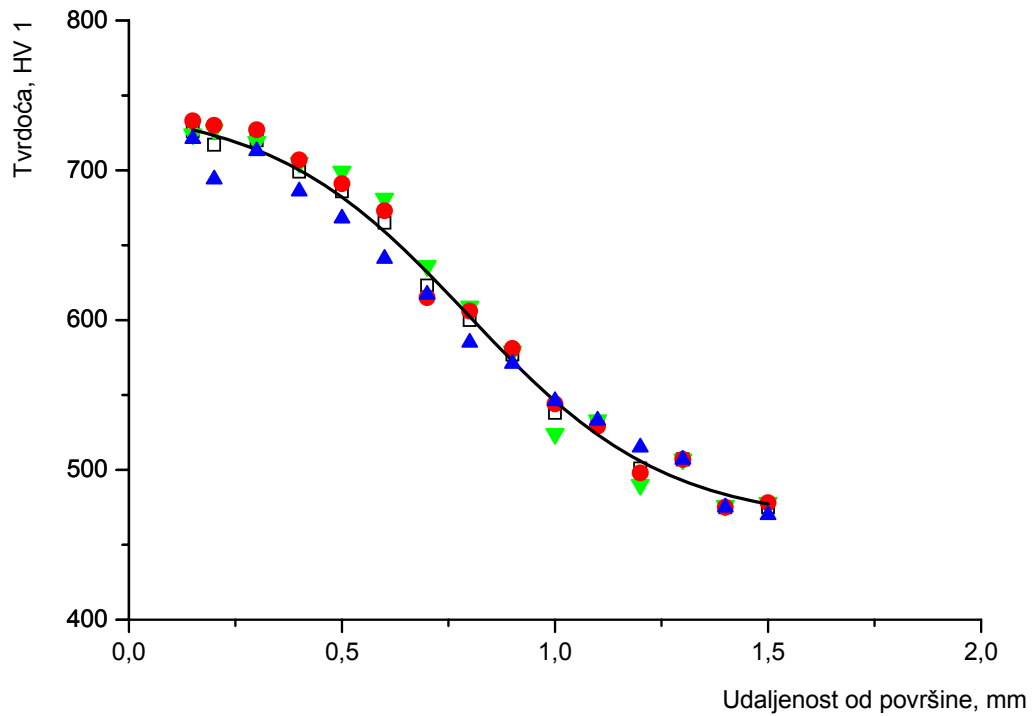
Uzorak E, Č4320, pougličan je režimom prema slici u Prilogu 6.

Nakon pougličavanja izmjerena je mikrotvrdoća uzorka E, te su dobiveni rezultati koji se nalaze u Tablici 9.

Tablica 9. Izmjerena mikrotvrdoća u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak E, Č4320

udaljenost od površine, mm	mikrotvrdoća, HV 1 niz I	mikrotvrdoća, HV 1 niz II	mikrotvrdoća, HV 1 niz III
0,15	721	724	733
0,2	694	727	730
0,3	713	719	727
0,4	686	705	707
0,5	668	699	691
0,6	641	681	673
0,7	617	636	615
0,8	585	609	606
0,9	571	579	581
1	546	524	544
1,1	533	533	529
1,2	515	490	498
1,3	507	507	507
1,4	475	476	475
1,5	470	478	478

Vrijednosti mikrotvrdoće na uzorku E izmjerene su u tri niza, a dijagram na slici 70 prikazuje krivulju prosječnih vrijednosti (uz krivulju su točkama označene vrijednosti sviju triju izmjerenih nizova).



Slika 70. Dijagram toka mikrotvrdoće u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak E, Č4320

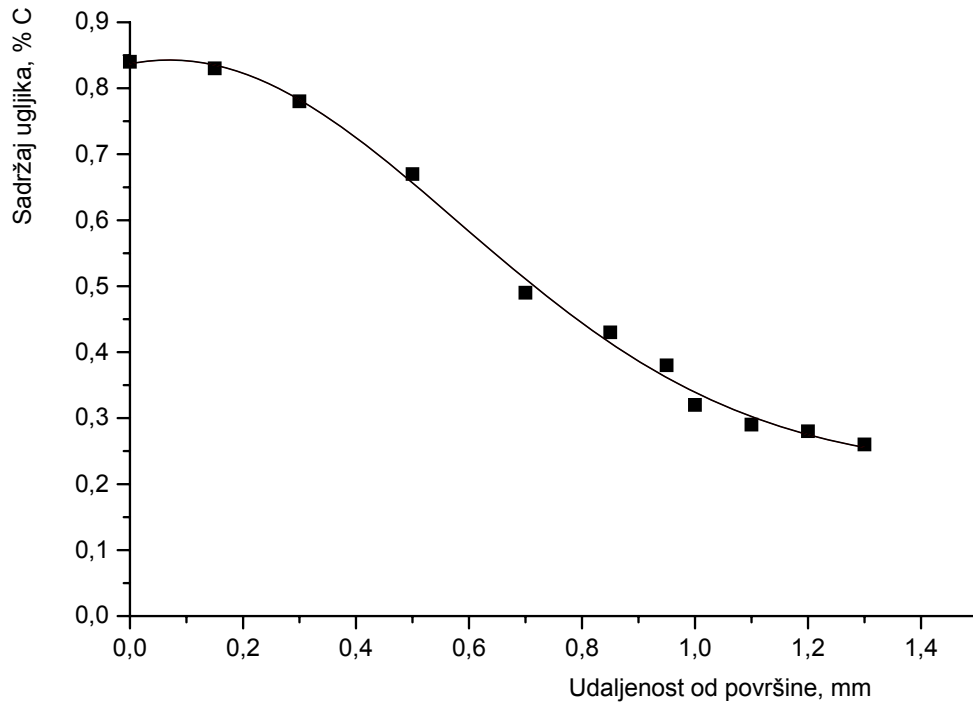
Izmjerene su vrijednosti sadržaja ugljika u ovisnosti o udaljenosti od površine.

Tablica 10. Izmjereni sadržaj ugljika u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak E, Č4320

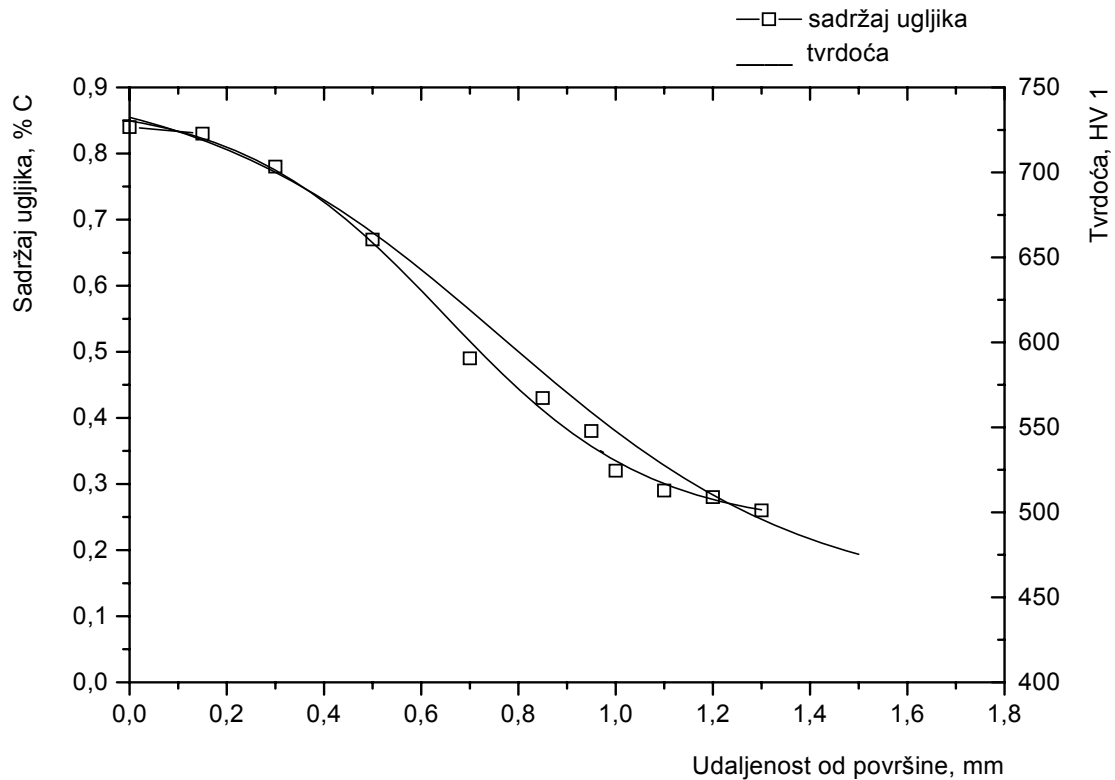
udaljenost od površine, mm	sadržaj ugljika, % C
0	0,84
0,15	0,83
0,3	0,78
0,5	0,67
0,7	0,49
0,85	0,43
0,95	0,38
1	0,32
1,1	0,29
1,2	0,28
1,3	0,26

Izmjerene vrijednosti udjela ugljika unesene su na dijagram na slici 71.

Na slici 72 prikazan je dijagram izmjerene mikrotvrdoće i izmjerenog toka ugljika.

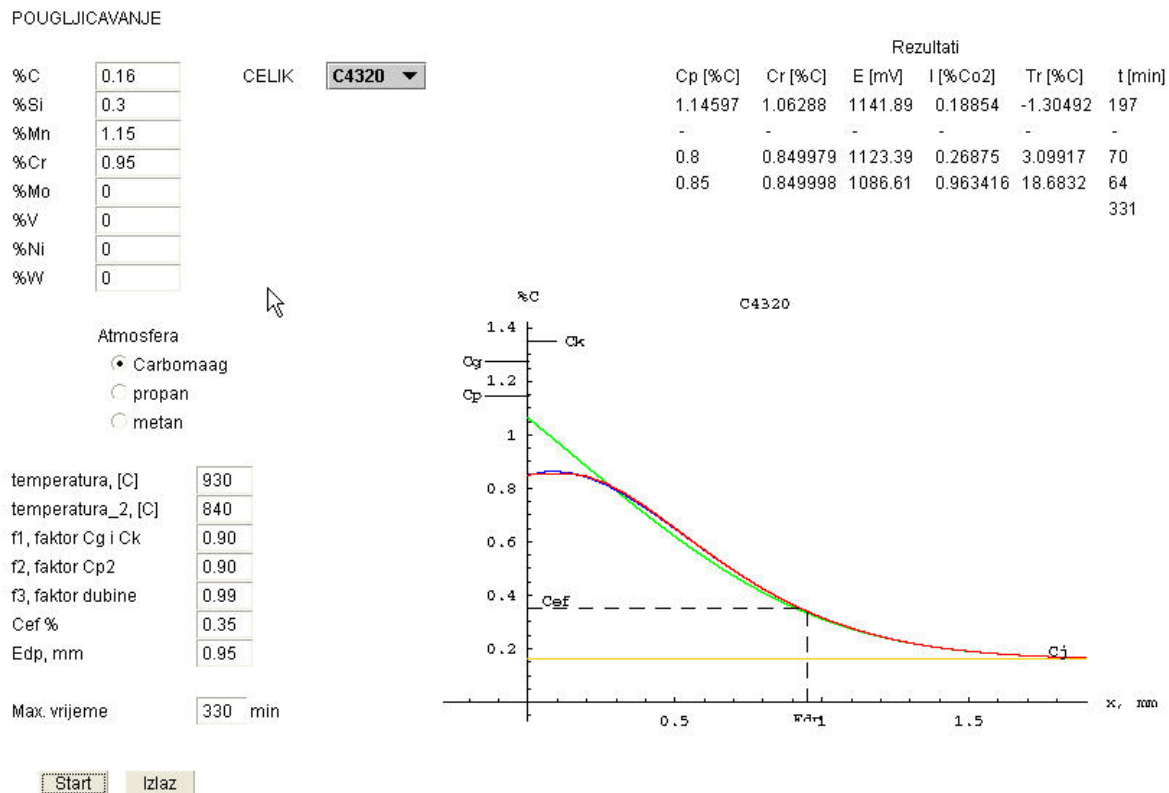


Slika 71. Dijagram izmjerenog toka ugljika u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak E, Č4320



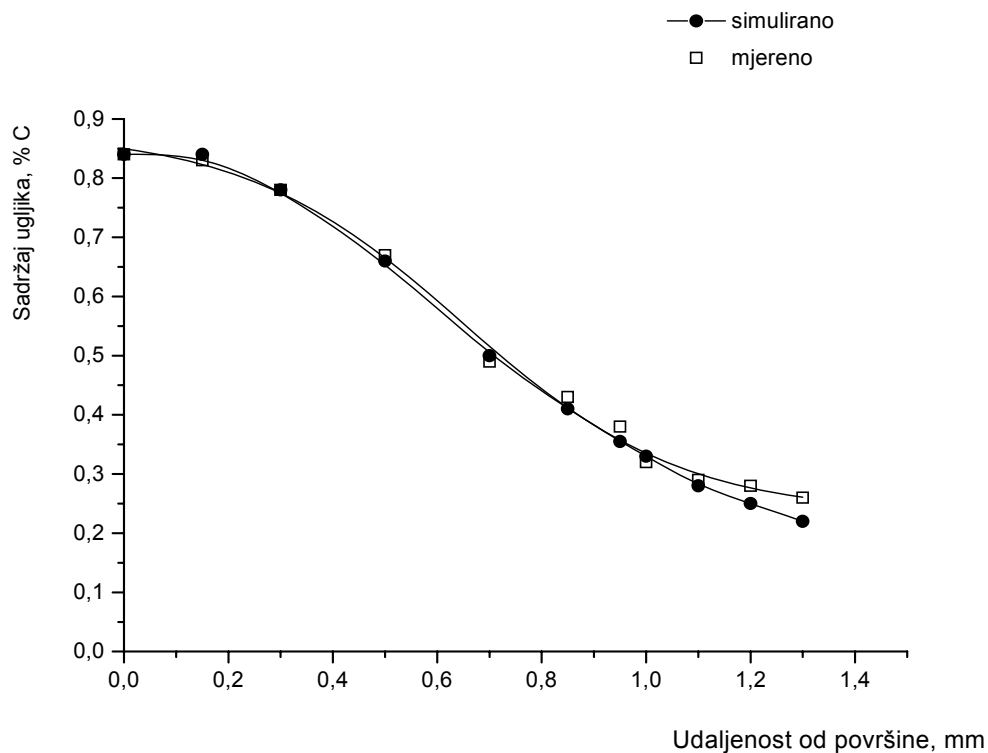
Slika 72. Dijagram izmjerenog toka mikrotvrdoće i toka ugljika, uzorak E, Č4320

U skladu s izmjerenim rezultatima mikrotvrdoće i sadržaja ugljika, izvršena je simulacija postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom paketu, na $E_{dp} = 0,95$ mm. Završna krivulja simulacije prikazana je na slici 73.



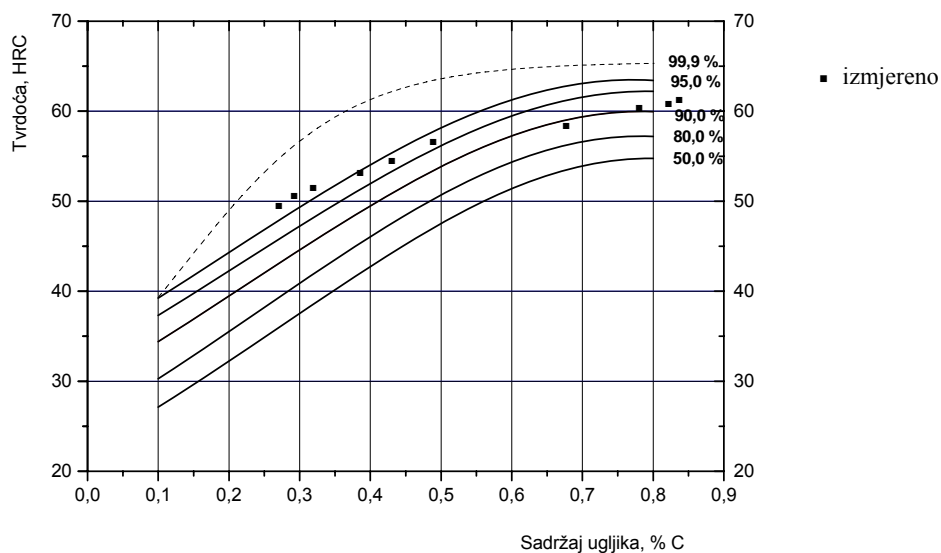
Slika 73. Završni ekran simuliranja postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu, uzorak E, Č4320, $E_{dp} = 0,95$ mm, $T_1 = 930$ °C, $T_2 = 840$ °C, $C_{p1} = 1,15$, $C_{p2} = 0,80$, $C_{p3} = 0,85$, uz zadani $C_R = 0,80$ - $0,85$, trajanje procesa 330 min.

Izmjereni i simulirani tok ugljika prikazani su na slici 74.



Slika 74. Usporedbeni prikaz izmjerenog toka ugljika i toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu, uzorak E, Č4320, $E_{dp}=0,95$ mm

Vrijednosti tvrdoće i sadržaja ugljika unesene su u Burns-ov dijagram.



Slika 75. Prikaz vrijednosti tvrdoće i sadržaja ugljika u Burns-ovom dijagramu, uzorak E, Č4320

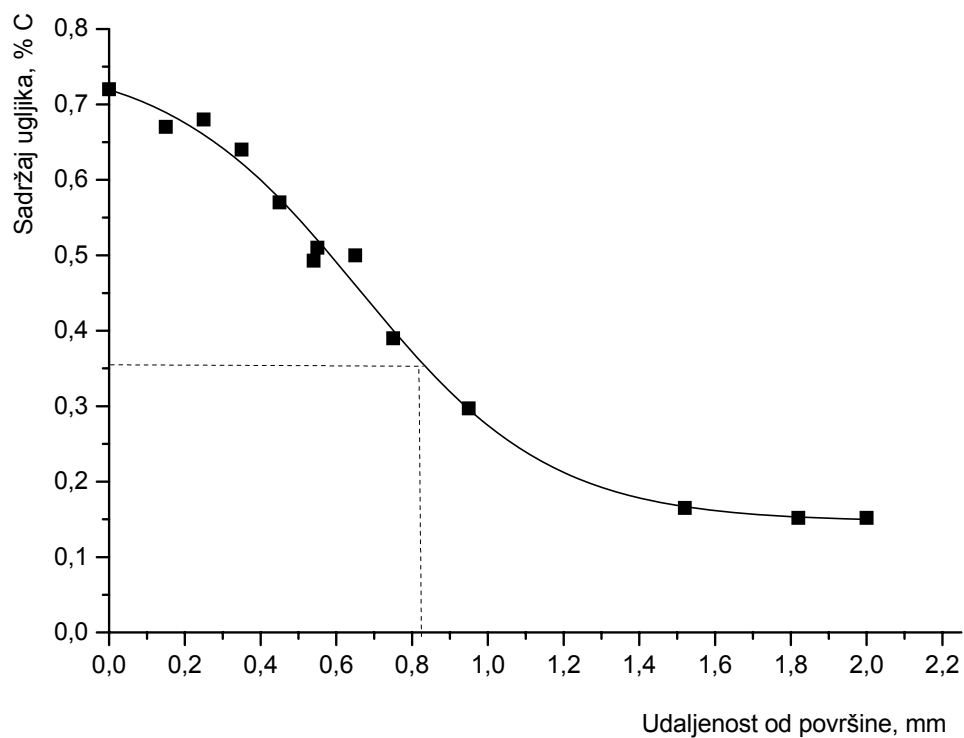
Pougljičavanje uzorka F

Uzorak F, od Č5421, pougljičen je režimom prema slici u Prilogu 7.

Nakon pougljičavanja je izmjeren sadržaj ugljika uzorka F, Tablica 11.

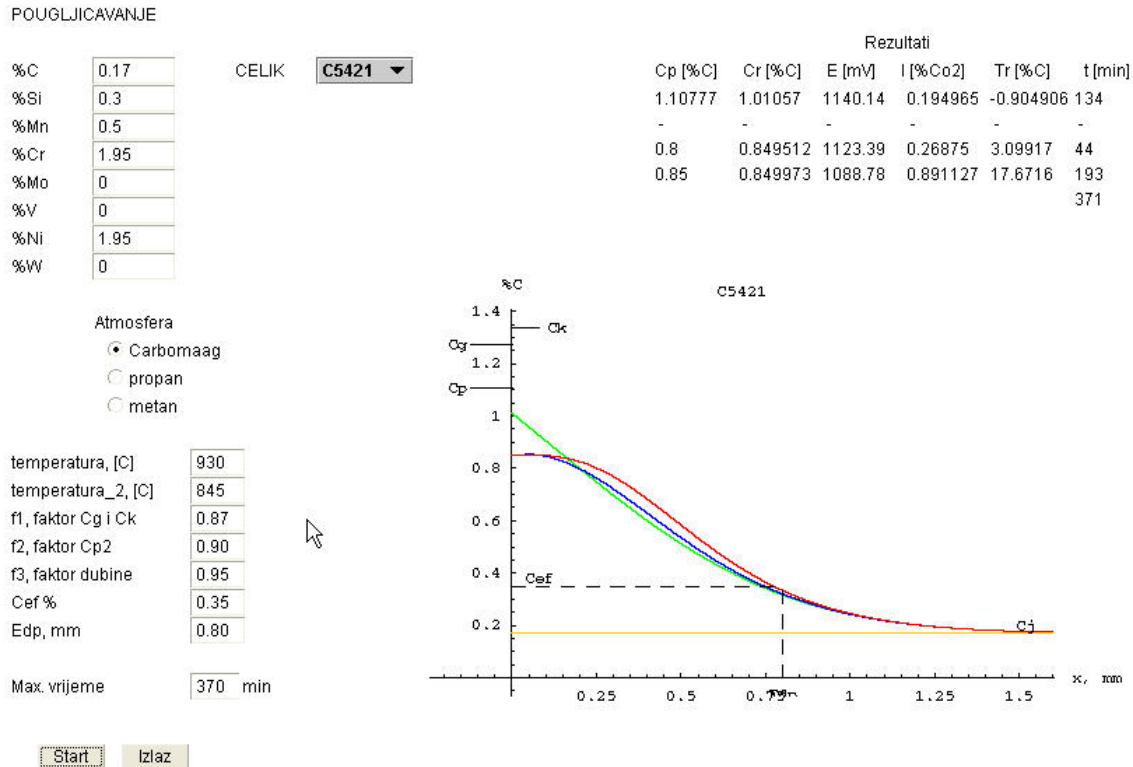
Tablica 11. Izmjereni sadržaj ugljika u ovisnosti o udaljenosti od površine, uzorak F, Č 5421

udaljenost od površine, mm	sadržaj ugljika, % C
0	0,72
0,15	0,67
0,25	0,68
0,35	0,64
0,45	0,57
0,54	0,493
0,55	0,51
0,65	0,5
0,75	0,39
0,95	0,297
1,52	0,181
1,82	0,172
2	0,172



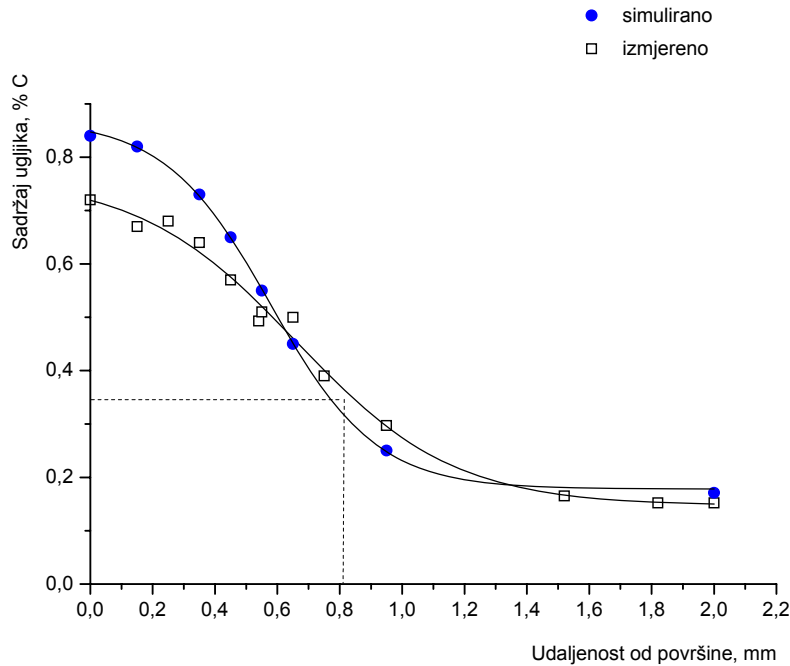
Slika 76. Dijagram izmjerenog toka ugljika u ovisnosti od udaljenosti od površine, uzorak F, Č5421

U skladu s dijagramom izmjerenog toka ugljika, simuliran je proces za $E_{dp} = 0,80$ mm, prema slici 77.

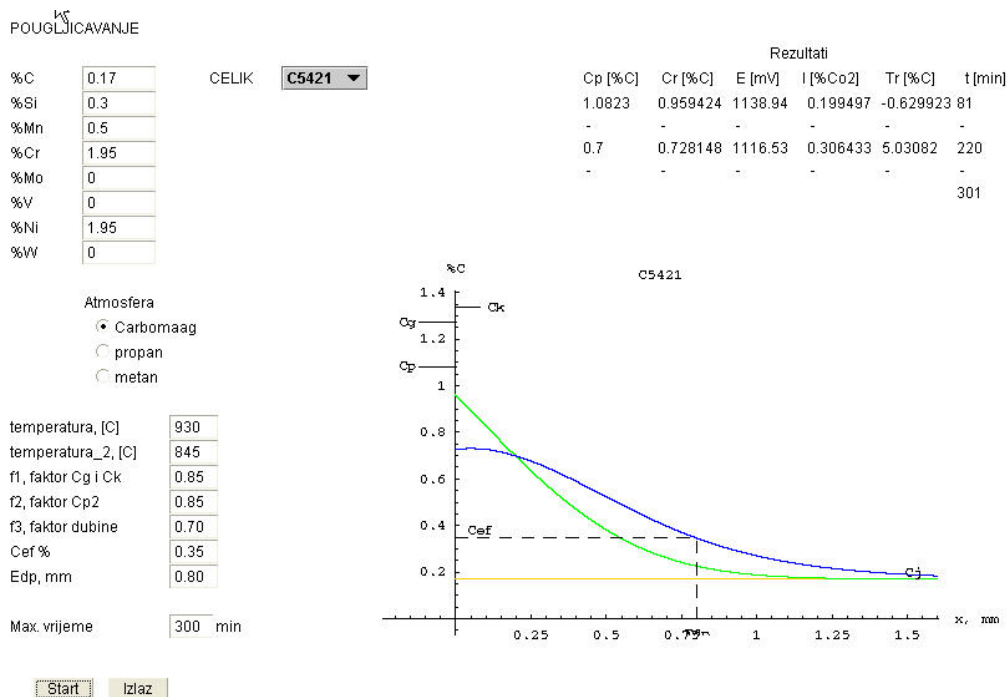


Slika 77. Završni ekran simuliranja postupka pougličavanja u vlastitom računalskom programu, uzorak F, Č5421, na $E_{dp} = 0,80$ mm, $C_{p1} = 1,10$, $C_{p2} = 0,80$, $C_{p3} = 0,85$, $T_1 = 930$ °C, $T_2 = 845$ °C, trajanje postupka 370 minuta

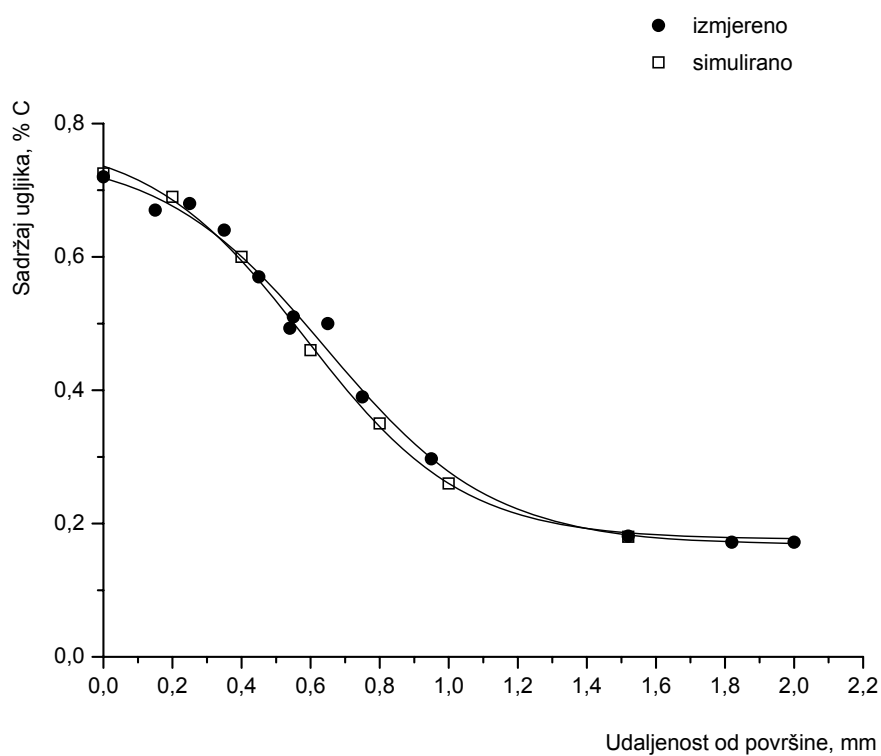
Izmjereni i simulirani tok ugljika prikazani su na slici 78.



Slika 78. Usporedbeni prikaz izmjerenog toka ugljika i toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu, uzorak F, Č5421, na $E_{dp}=0,80$ mm



Slika 79. Završni ekran simuliranja postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu, uzorak F, Č5421, na $E_{dp} = 0,80$ mm, $C_{p1}=1,10$, $C_{p2}=0,70$, $T_1=930$ °C, $T_2=845$ °C, uz zadani $C_R=0,75-0,80$, trajanje postupka 300 minuta

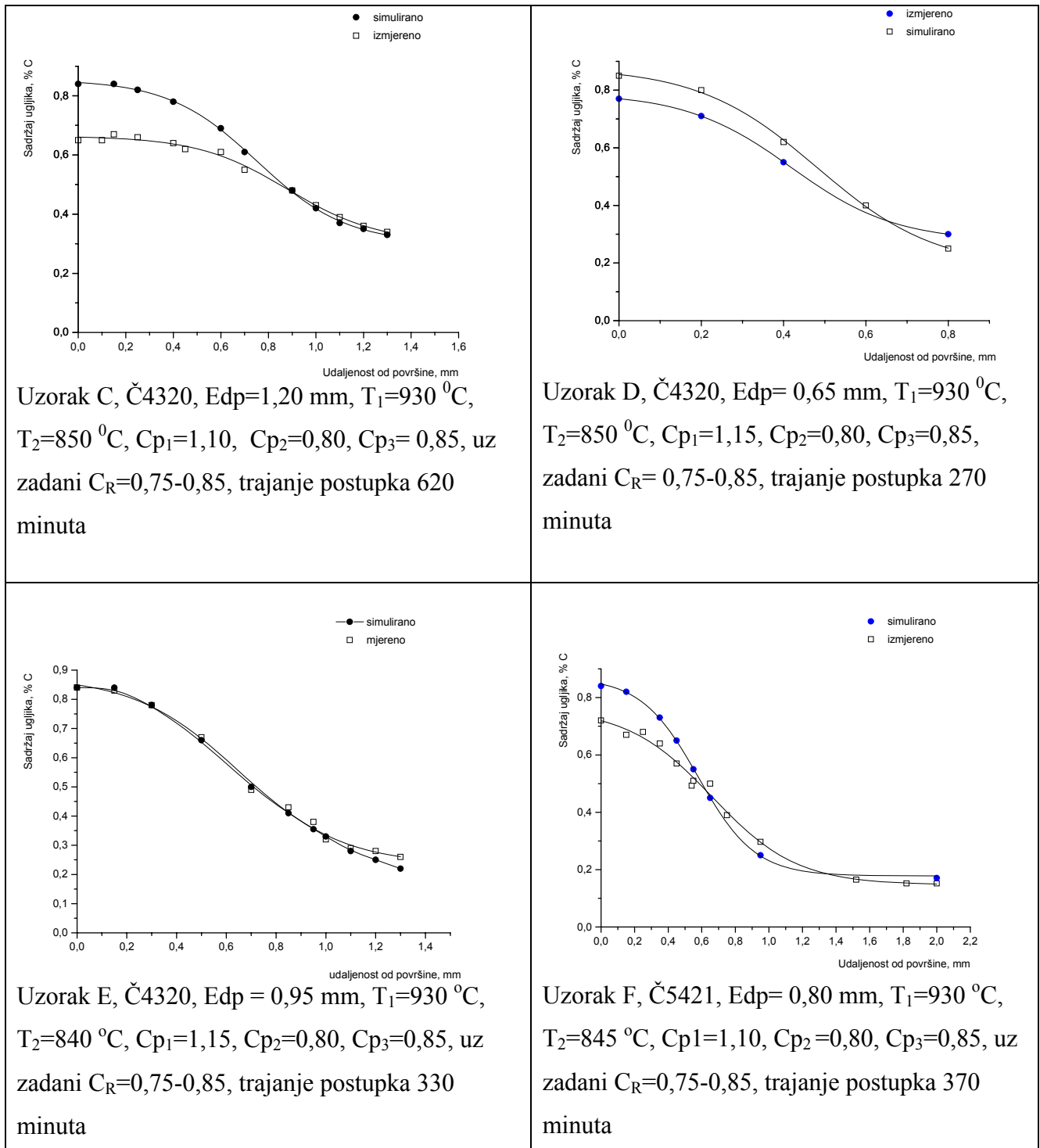


Slika 80. Usporedbeni prikaz izmjerenog toka ugljika i toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka pougljičavanja u vlastitom računalskom programu, uzorak F, Č5421, na $E_{dp}=0,80$ mm, $C_{p1}=1,10$, $C_{p2}=0,70$, $T_1=930$ °C, $T_2=845$ °C, uz zadani $C_R=0,75-0,80$, trajanje postupka 300 minuta

3.2.1 Analiza eksperimentalnih rezultata kod pougljičavanja u sklopu postupka cementiranja

Dijagrami toka ugljika

Na slici 81 prikazane su usporedbe izmjerenih i simuliranih sadržaja ugljika nakon procesa pougljičavanja u sklopu postupka cementiranja, u ovisnosti o udaljenosti od površine.



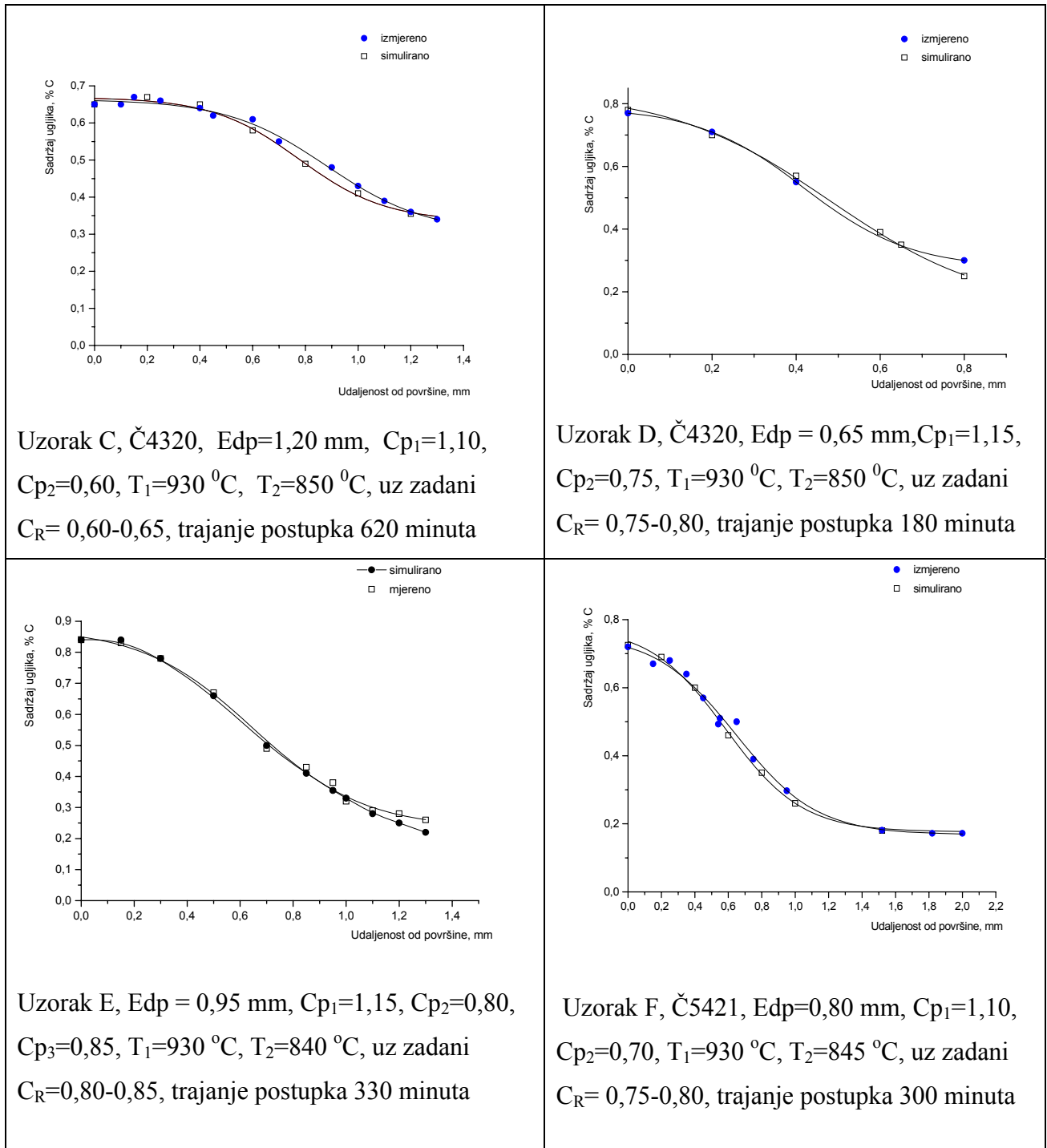
Slika 81. Prikaz izmjerenih i simuliranih tokova ugljika za uzorke C, D, E i F, uz zadani $C_R=0,75-0,85$

Svi se prikazi odnose na simuliranje uz zadani sadržaj ugljika na površini 0,75-0,85, a postupak je proveden uz vremena trajanja postupka koja su odgovarala vremenima stvarno provedenog postupka.

Odstupanje izmjerenih i simuliranih vrijednosti je posebno veliko kod uzorka C, i to posebice u površinskom području, gdje je izmjereni tok ugljika bitno niži od toka ugljika dobivenog simuliranjem postupka. Vjerojatni je razlog tome u duljem predgrijavanju i primjeni C-potencijala pri nižim temperaturama u provedenom tehnološkom postupku (režim u prilogu 4), pri čemu dolazi do začađenja površine te otežavanja difuzije ugljika. To je vjerojatno i razlog za dobivanje E_{dp} od samo 1,20 mm, dok je ciljane E_{dp} u ovom tehnološkom postupku bila 1,6 mm. Slično, ali manje odstupanje pojavilo se i kod uzorka F, dok je bolje podudaranje kod uzorka D i kod uzorka E.

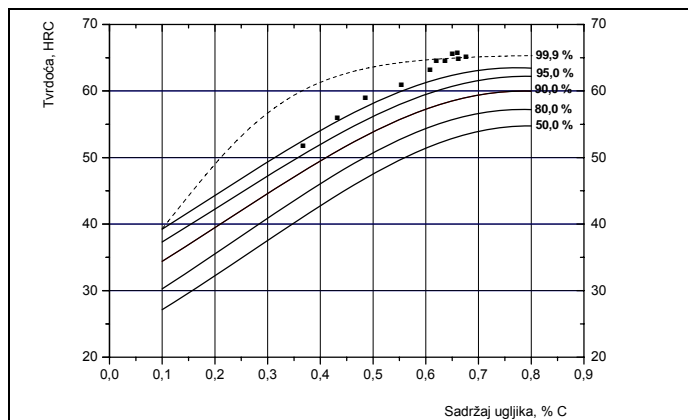
Radi utvrđivanja podudarnosti izmjerenih i simuliranih veličina, izvršena su ponovljena simuliranja u kojima su za rubne vrijednosti sadržaja ugljika postavljene vrijednosti koje su dobivene u provedenim tehnološkim postupcima. Postupci su ponavljani dok nije dobivena najbolja podudarnost izmjerenih i simuliranih krivulja ugljika. Simulacija nije obavljena za uzorak E, jer je podudarnost koja je dobivena prvim simuliranjem već bila dobra. Ponovljene su simulacije prikazane na slici 82.

Iz slike 82 vidljivo je da najveće razlike u trajanju postupka nastaju kod kraćih vremena trajanja postupka (uzorak D, koji je u stvarnom tehnološkom postupku pougljičavan 270 minuta, a simuliranjem je zadani profil ugljika postignut za 180 minuta i uzorak F, koji je u stvarnom tehnološkom postupku pougljičavan 370 minuta, a simuliranjem je zadani profil ugljika postignut za 300 minuta). Za pretpostaviti je da je tome tako radi toga što izrađeni programski paket ne uzima u obzir vrijeme ugrijavanja i tromost šarže uslijed mase, već počinje teći sa zadane temperature pougljičavanja tj. odvija se u idealnim termodinamičkim uvjetima.

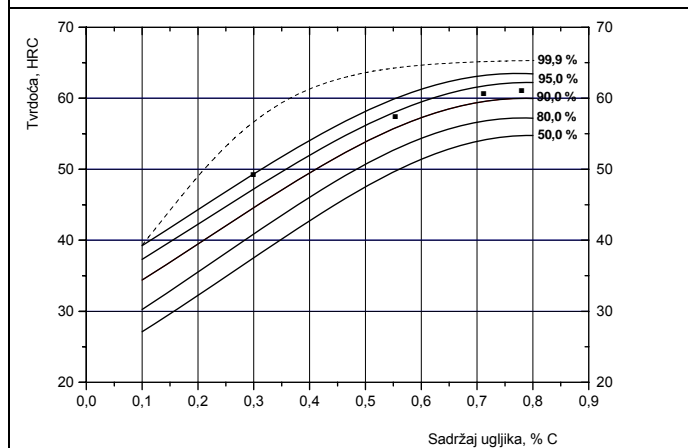


Slika 82. Prikaz izmjerenih i simuliranih tokova ugljika za uzorke C, D, E i F, uz zadane C_R u skladu s vrijednostima izmjerenim na uzorcima

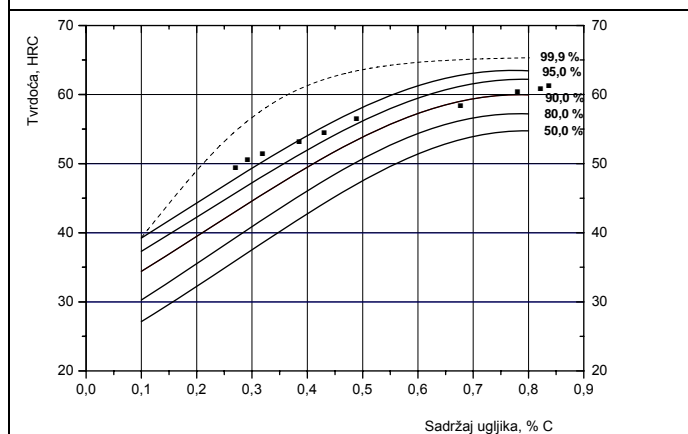
Burns-ovi dijagrami



Uzorak C



Uzorak D



Uzorak E

Slika 83. Prikaz tvrdoća i sadržaja ugljika u Burns-ovom dijagramu, za uzorke C, D, E

Iz Burns-ovih je dijagrama vidljivo da se udjeli martenzita uglavnom kreću u području oko 95%. Iako je podatak orijentacijski, ovakvi bi udjeli martenzita u strukturi bili povoljni.

4 ZAKLJUČCI

Izradi računalskog programa za simuliranje pougljičavanja prišlo se od pretpostavke da se postupak pougljičavanja rukovodi načelima fizikalne kemije, tj. da se proces odvija po načelima termodinamičke aktivnosti ugljika u austenitu. Izraz koji je temelj za odvijanje postupaka pougljičavanja jest $\frac{\partial a_C}{\partial t} = D \frac{\partial a_C^2}{\partial x^2}$. Pri izradi programa za pougljičavanje uzet je u obzir utjecaj legirajućih elemenata u čeliku na postupak difuzije ugljika te je postupak vođen tako da ne dolazi do nastajanja štetnih faza (čade, karbida).

Provedeni su pokusi pougljičavanja za postupke pougljičavanja prije difuzijskog stvaranja karbida i za postupke pougljičavanja u sklopu postupka cementiranja.

Na pougljičenim su uzorcima izmjereni udjeli ugljika po dubini pougljičenog sloja (kod pougljičavanja prije stvaranja karbida i kod pougljičavanja u sklopu cementiranja) te mikrotvrdoća slojeva po dubini pougljičenog sloja (kod postupka pougljičavanja u sklopu postupka cementiranja).

Kod postupaka pougljičavanja prije difuzijskog stvaranja karbida dobivena je izvrsna podudarnost simuliranog i izmjenenog profila ugljika. Time je potvrđena ispravnost mehanizma koji se rukovodi načelima termodinamičke aktivnosti ugljika.

Kod postupaka pougljičavanja u sklopu postupka cementiranja provedeno je simuliranje postupka uz ulazne parametre koji su obuhvaćali C_R u granicama 0,75-0,85 te trajanje postupka u skladu s provedenim tehnološkim postupkom. Pri simuliranju procesa primijenjeni su C-potencijali koji su jamčili ispravno vođenje postupka, tj. izbjegavanje nastajanja štetnih faza (čade i karbida). Utvrđeno je da kod postupka pougljičavanja na veliku dubinu pougljičavanja (uzorak C, željena dubina 1,6 mm) dolazi do velike razlike između simuliranog i izmjenenog profila ugljika, a naročito u površinskom sloju, a efektivna dubina pougljičenog sloja bila je znatno manja od željene. Razlog je tome vjerojatno u pogonskim uvjetima koji ne odgovaraju idealnim uvjetima: predgrijavanje pri kojemu je nastala čada koja je blokirala dalju difuziju ugljika prema unutrašnjosti. Ponovljenim simuliranjem kod kojega je zadan niži C_R od 0,60-0,65 dobiveno je izvrsno podudaranje simuliranog i izmjenenog toka ugljika.

Kod postupaka s manjim ciljanim efektivnim dubinama pougljičavanja ispostavilo se da je podudaranje simuliranog i izmjerenog profila ugljika izvrsno, a simulirano je vrijeme trajanja postupka kraće od vremena koje je u tehnološkom postupku stvarno utrošeno za dobivanje izmjerenog profila ugljika. To je posljedica činjenice da izrađeni program za simuliranje pretpostavlja postojanje idealnih termodinamičkih uvjeta i ne uzima u obzir vrijeme predgrijavanja i tromost šarže i peći kod ugrijavanja.

Može se zaključiti da za provedene pokuse izrađeni računalski program za simuliranje pougljičavanja daje dobru podudarnost profila ugljika s izmjerenim profilom ugljika. Stoga je ovaj program prikladan za određivanje režima pougljičavanja za različite čelike, a pruža i dobre mogućnosti za razmatranje i analiziranje utjecaja raznih faktora na tok procesa pougljičavanja. Tako se dobro može predviđati koja će se poboljšanja u procesu dobiti promjenom parametara procesa te odlučiti o vođenju procesa na najekonomičniji način.

Postojeći računalski program vrlo je prikladan za razmatranja te za uvjete kod kojih je masa šarže koja se pougljičava mala i gdje je stoga dolazak na temperaturu procesa brz ili za postupke s vrlo dugim trajanjima (kod dubokih traženih dubina slojeva) i manjim masama šarže, gdje vrijeme predgrijavanja čini manji udio u trajanju procesa i gdje tromost šarže i peći nije izražena te time ti faktori nemaju većega utjecaja na točnost konačnih rezultata.

Za eventualnu primjenu za vođenje procesa u industriji ovaj je program moguće prilagoditi unošenjem termodinamičkog proračuna za masu šarže, pripadajuću veličinu komore, vrstu izolacije i ostalih značajnih parametara.

PRILOZI

- PRILOG 1 - Ekran postupka Master - Carb za vođenje procesa pougljičavanja
- PRILOG 2 - Prikaz ekrana računalskog paketa za simuliranje procesa pougljičavanja, Carb-o-Prof (Ipsen)
- PRILOG 3 - Režimi pougljičavanja uzorka A, Č3840 i B, Č4751, tvornička dokumentacija Feroimpex, Zagreb
- PRILOG 4 - Režimi pougljičavanja uzorka C, Č4320, tvornička dokumentacija Feroimpex, Zagreb
- PRILOG 5 - Režim pougljičavanja uzorka D, Č4320, tvornička dokumentacija Feroimpex, Zagreb
- PRILOG 6 - Režimi pougljičavanja uzorka E, Č4320, tvornička dokumentacija Feroimpex, Zagreb
- PRILOG 7 - Režim pougljičavanja čelika uzorka F, Č5421, tvornička dokumentacija Feroimpex, Zagreb
- PRILOG 8 - Računalski program za simuliranje pougljičavanja prije stvaranja karbida i u sklopu postupka cementiranja, CD

PRILOG 1

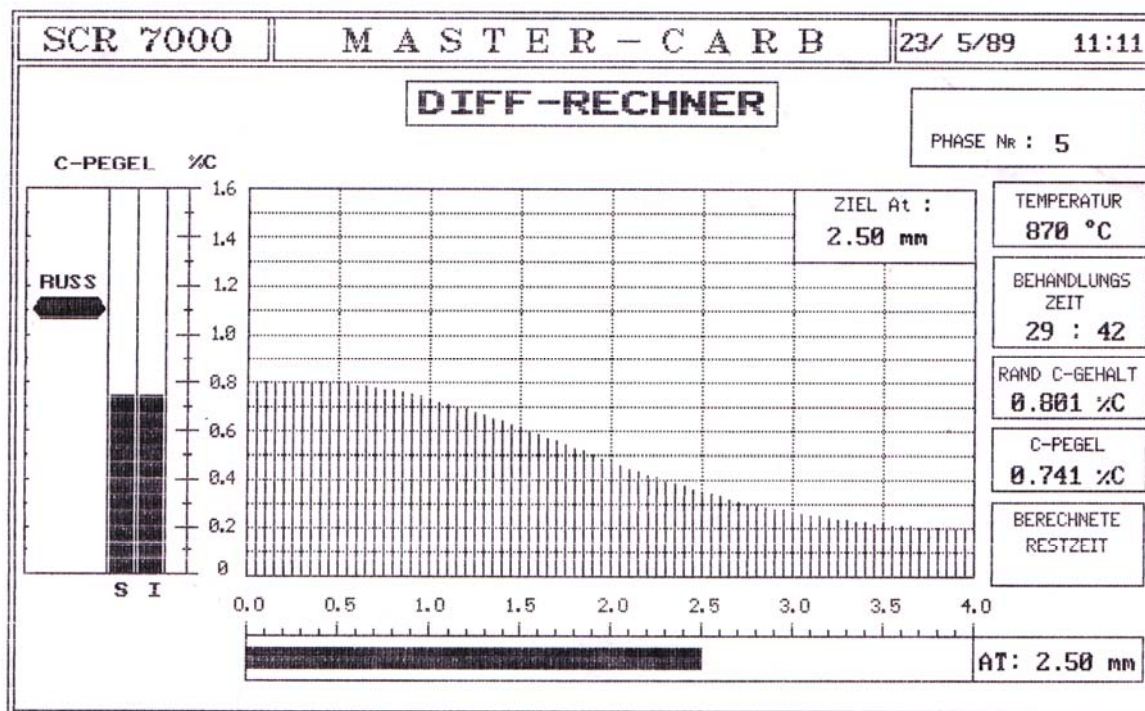
```
=====
WAERME BEHANDLUNG NACHWEIS
=====

Teil :2345-765-678879STANGE 2
Härterei :H1
Sachbearbeiter :S1
Auftrag Nr :A1
Ofen Nr :1
Chargen Nr :C1
Stahl Art :1.6587 :17 CrNiMo 6 Legierungsfaktor: 1.08
Gewicht :345
Datum : 05/23/89
Zeit : 11:06:36
Dauer : 29:42
Aufkohlungstiefe : 2.50
bei %C : 0.35
%C Rand : 0.80
Start Temperatur : 820
Aufkohlungstemperatur : 930
Diffusionstemperatur : 870

Aufkohlungs C-pegel : 1.20
Aufkohlungsoptimierungsfaktor :95
Ende der Aufkohlung bei % Aufkohlungstiefe :90

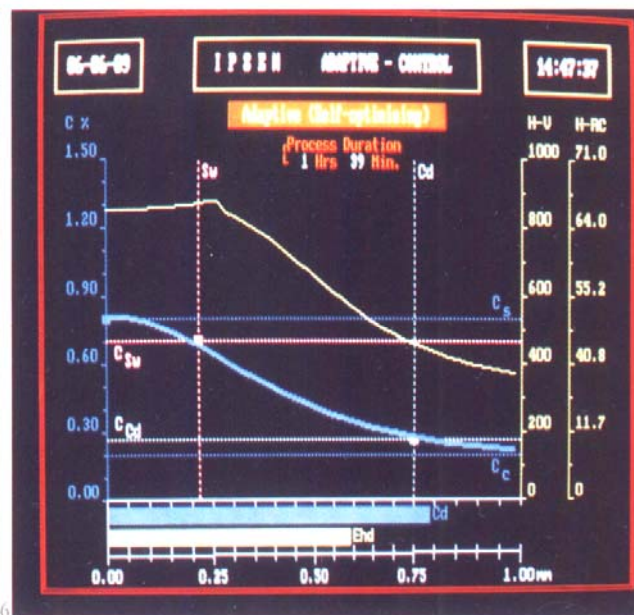
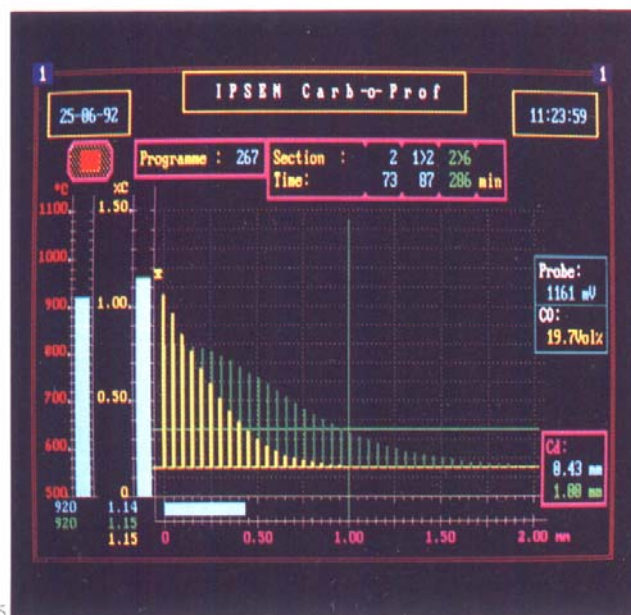
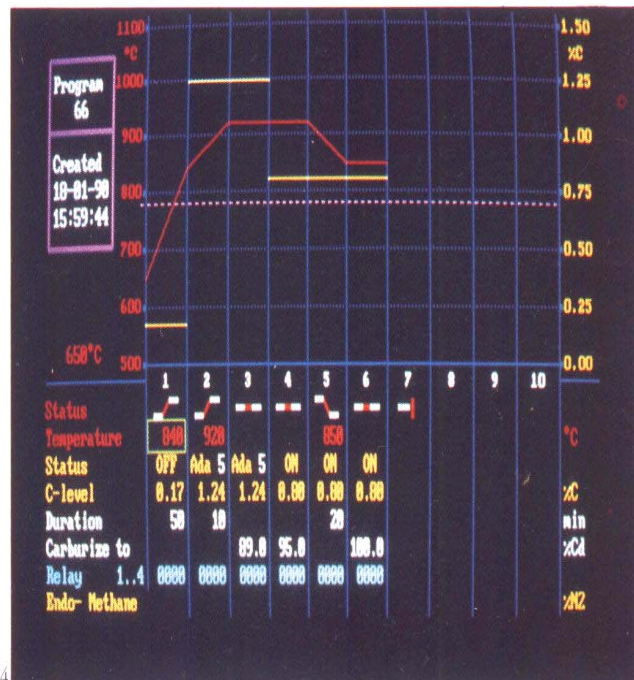
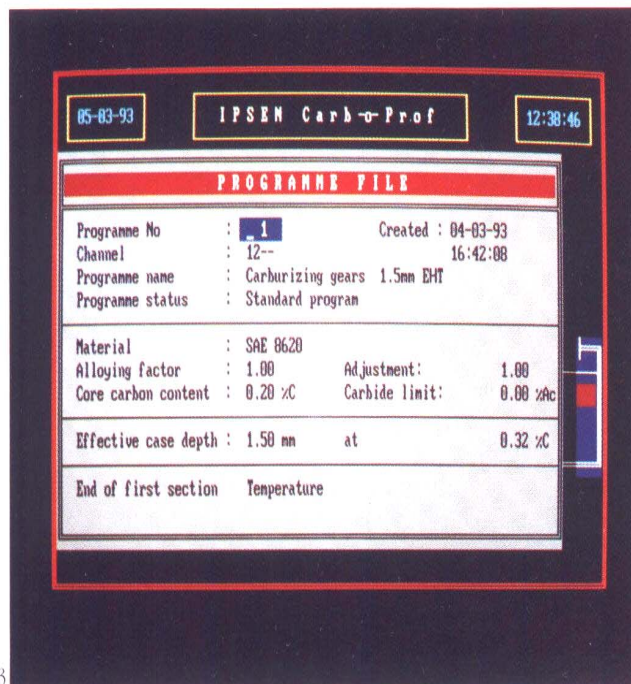
Aufkohlungsverlauf

Zeit ----- %C bei Randabstand von ----- AT [mm]
hhh:mm 0 0.1 0.2 0.3 0.5 1 2 4 8
29:42 0.80 0.80 0.80 0.80 0.79 0.73 0.47 0.19 0.17 2.50
=====
```



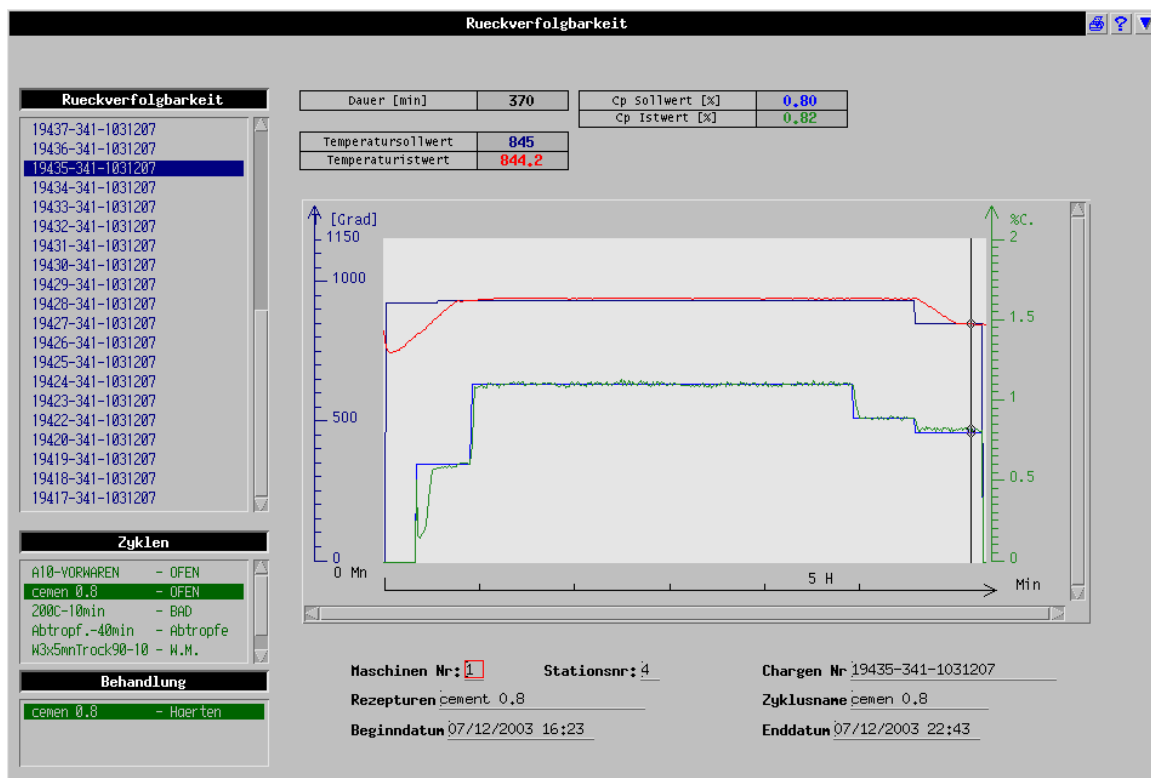
Ekran postupka Master - Carb za vođenje procesa pougljičavanja

PRILOG 2



Prikaz ekrana računalskog paketa za simuliranje procesa pougljičavanja, Carb-o-Prof (Ipsen)

PRILOG 3



Behandlung

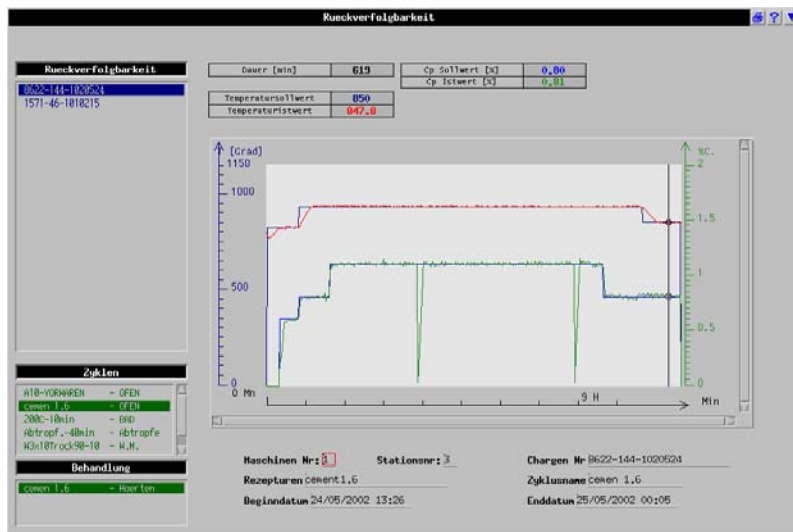
Block ausgabe Block nachher einfügen Block vorher einfügen Block loeschen Behandlung speichern Verlassen

Behandlungname cemen 0,8

	Anfangsblock	Ausgleichung	Halten	Halten	Halten	Endblock
Dauer		10,00	250,00	20,00	20,00	
geschaetzte Dauer	60,00	10,00	0,00	0,00	50,00	1,00
Temperaturrampe	max. Rampe	max. Rampe	max. Rampe	max. Rampe	max. Rampe	max. Rampe
Toleranz T [°C]	50	10	5	5	20	5
Temperatursollwert	920	930	930	930	845	845
N2 Menge [l/min]						
Durchfluss H2 [l/min]						
Anreicherung [%]						
Anreicherung [l/h]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Cp. Sollwert [%]	0,60	0,60	1,10	0,90	0,80	0,80
Toleranz Cp [%]	0,40	0,40	0,40	0,05	0,05	0,05
Regelungstyp	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT

Režimi pougljičavanja uzorka A, Č3840 i B, Č4751

PRILOG 4



Behandlung

Block ausgabe Block nachher einfügen Block vorher einfügen Block löschen Behandlung speichern Verlassen

Behandlungname **Cehen 1.6**

Dauer	Anfangsblock	Ausgleichung	Ausgleichung	Halten	Halten	Halten
geschaetzte Dauer	60.00	30.00	30.00	240.00	180.00	60.00
Temperaturraupe	max. Raupe	max. Raupe	max. Raupe	max. Raupe	max. Raupe	max. Raupe
Toleranz T [°C]	50	5	10	5	5	5
Temperatursollwert	820	820	830	830	830	830
N2 Menge [l/min]						
Durchfluss N2 [l/min]						
Anreicherung [s]	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Anreicherung [l/h]	0.60	0.60	0.90	1.10	1.10	0.90
Cp. Sollwert [K]	0.40	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05
Toleranz Cp [K]						
Regelungstyp	CO-FESTMERT	CO-FESTMERT	CO-FESTMERT	CO-FESTMERT	CO-FESTMERT	CO-FESTMERT

Behandlung

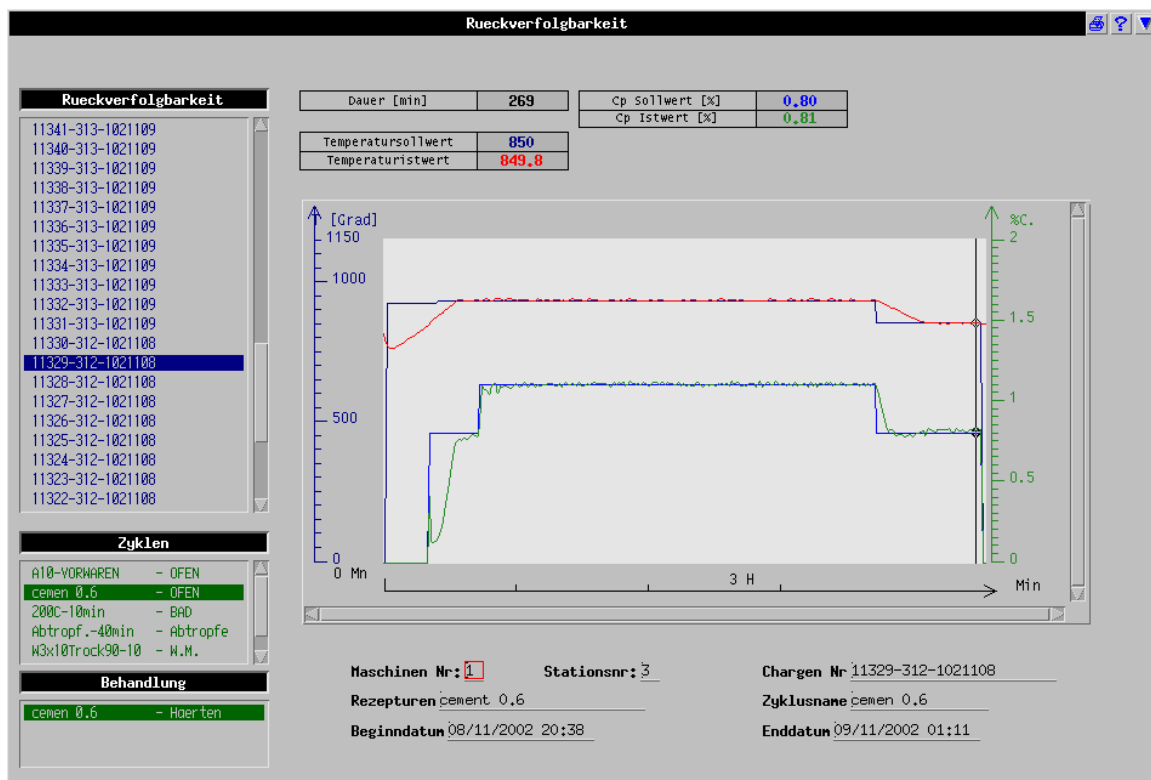
Block ausgabe Block nachher einfügen Block vorher einfügen Block löschen Behandlung speichern Verlassen

Behandlungname **Cehen 1.6**

gshlock	Ausgleichung	Ausgleichung	Halten	Halten	Halten	Halten	Endblock
30.00	30.00	30.00	240.00	180.00	60.00	40.00	
0.00	0.00	60.00	0.00	0.00	0.00	30.00	1.00
Raape	max. Raape	max. Raape	max. Raape	max. Raape	max. Raape	max. Raape	max. Raape
50	5	10	5	5	5	20	5
820	820	830	830	830	830	850	850
2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
0.60	0.60	0.90	1.10	1.10	0.90	0.90	0.90
0.40	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
FESTMERT	CO-FESTMERT	CO-FESTMERT	CO-FESTMERT	CO-FESTMERT	CO-FESTMERT	CO-FESTMERT	CO-FESTMERT

Režimi pogljičavanja uzorka C, Č4320, tvornička dokumentacija Feroimpex, Zagreb

PRILOG 5



Behandlung

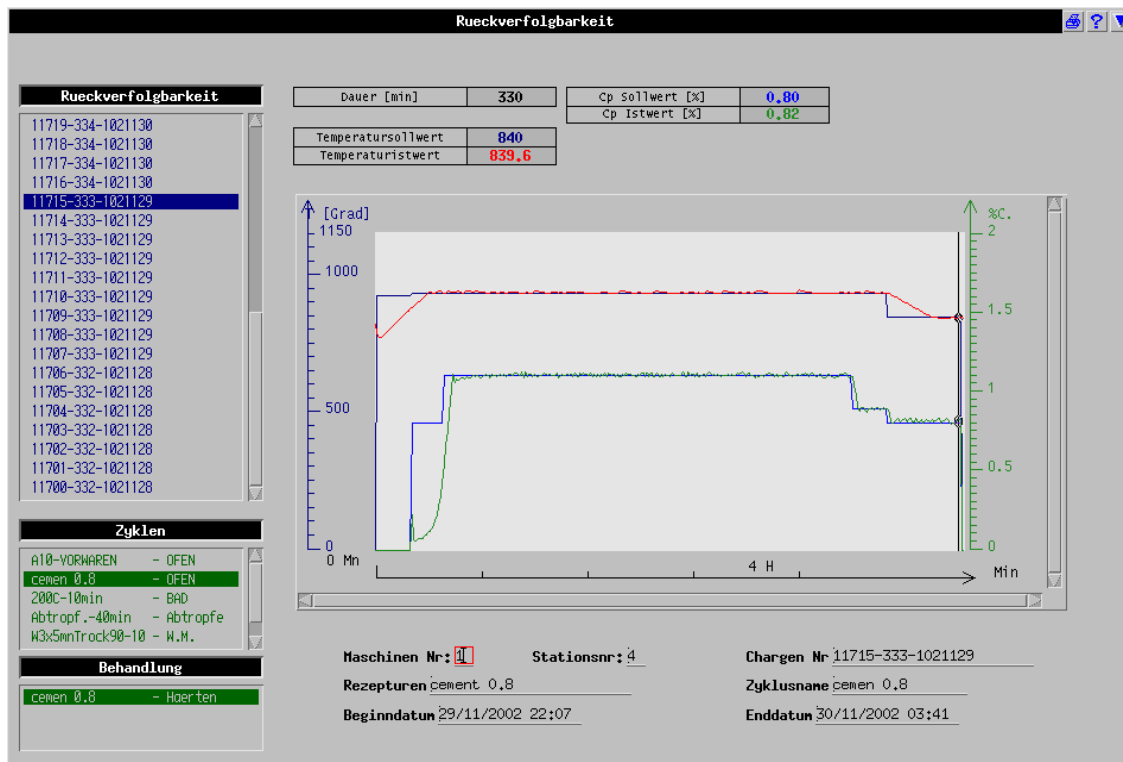
Block ausgabe
Block nachher einfüegen
Block vorher einfüegen
Block loeschen
Behandlung speichern
Verlassen

Behandlungname cemen 0,6

	Anfangsblock	Ausgleichung	Halten	Halten	Endblock
Dauer		10.00	180.00	30.00	
geschaetzte Dauer	60.00	10.00	0.00	50.00	1.00
Temperaturrampe	max. Rampe	max. Rampe	max. Rampe	max. Rampe	max. Rampe
Toleranz T [°C]	50	5	5	20	5
Temperatursollwert	920	930	930	850	850
N2 Menge [l/min]					
Durchfluss H2 [l/min]					
Anreicherung [%]					
Anreicherung [l/h]	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Cp. Sollwert [%]	0.80	0.80	1.10	0.80	0.80
Toleranz Cp [%]	0.40	0.10	0.05	0.05	0.05
Regelungstyp	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT

Režim pougljičavanja uzorka D, Č4320, tehnološka dokumentacija Feroimpex, Zagreb

PRILOG 6



Behandlung

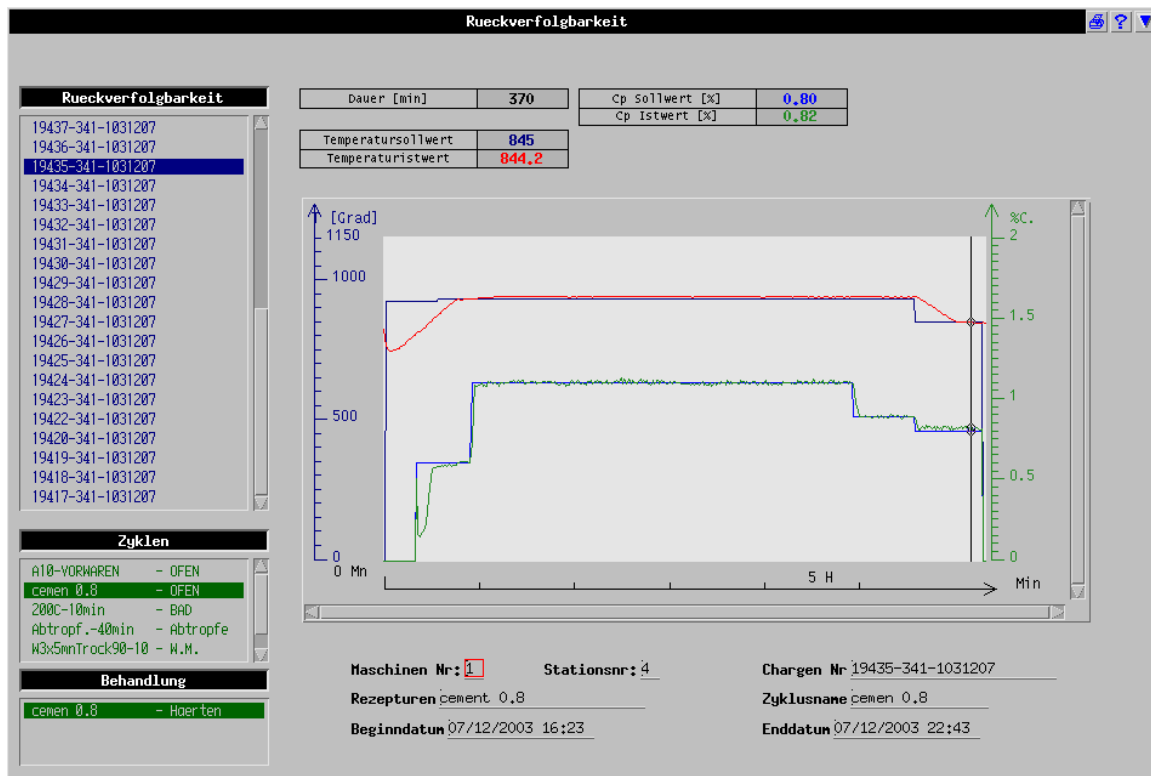
Block ausgabe Block nachher einfuegen Block vorher einfuegen Block loeschen Behandlung speichern Verlassen

Behandlungname cewen 0.8

	Anfangsblock	Ausgleichung	Halten	Halten	Halten	Endblock
Dauer		10.00	230.00	20.00	20.00	
geschaetzte Dauer	60.00	10.00	0.00	0.00	50.00	1.00
Temperaturrampe	max. Rampe	max. Rampe	max. Rampe	max. Rampe	max. Rampe	max. Rampe
Toleranz T [°C]	50	10	5	5	20	5
Temperatursollwert	920	930	930	930	840	840
N2 Menge [l/min]						
Durchfluss H2 [l/min]						
Anreicherung [%]						
Anreicherung [l/h]	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Cp. Sollwert [%]	0.60	0.80	1.10	0.90	0.80	0.80
Toleranz Cp [%]	0.40	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05
Regelungstyp	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT

Režim pougljičavanja uzorka E, Č4320, tehnološka dokumentacija Feroimpex, Zagreb

PRILOG 7



Behandlung

Block ausgabe
Block nachher einfügen
Block vorher einfügen
Block loeschen
Behandlung speichern
Verlassen

Behandlungname cemen 0,8

	Anfangsblock	Ausgleichung	Halten	Halten	Halten	Endblock
Dauer		10.00	250.00	20.00	20.00	
geschaetzte Dauer	60.00	10.00	0.00	0.00	50.00	1.00
Temperaturrampe	max. Rampe	max. Rampe	max. Rampe	max. Rampe	max. Rampe	max. Rampe
Toleranz T [°C]	50	10	5	5	20	5
Temperatursollwert	920	930	930	930	845	845
N2 Menge [l/min]						
Durchfluss H2 [l/min]						
Anreicherung [%]						
Anreicherung [l/h]	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Cp. Sollwert [%]	0.60	0.60	1.10	0.90	0.80	0.80
Toleranz Cp [%]	0.40	0.40	0.40	0.05	0.05	0.05
Regelungstyp	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT	CO-FESTWERT

Režim pougljičavanja uzorka F, Č5421, tvornička dokumentacija Feroimpex, Zagreb

LITERATURA

1. B. Matijević: "Kinetika difuzijskog stvaranja karbidnih slojeva", disertacija FSB, Zagreb, 1997.
2. Mladen Stupnišek, Božidar Matijević: New Duplex Diffusion Coating Process, 8 th Seminar of the IFHTSE, Dubrovnik-Cavtat, Hrvatska, 12-14.09.2001.
3. Grupa autora: ASM Handbook 3, Alloy Phase Diagrams, ASM International, Materials Park Ohio, USA, 1999.
4. Geoffrey Parrish: "Carburizing: Microstructures and Properties", ASM International, Materials Park Ohio, USA, 1999.
5. Ipsen on Top, (1999), 2/24, Ipsen, Kleve, Njemačka
6. Stupnišek i ostali: "Termokemijski postupci", Metalbiro, Zagreb, 1978.
7. Grupa autora: Termička obrada čelika, Metalbiro, Zagreb 1978.
8. Mladen Stupnišek, Zdravko Virag: "Novi matematički model plinskog pougljičavanja čelika", Sveučilišna naklada Liber, Zbornik radova FSB, Zagreb
9. F. Neumann: Grundlagen zur Gasaufohlung, HTM (1994), 2/81
10. B. Edenhofer, H. Pfau: "Die adaptive C-Profilregelung", HTM (1988), 43/288-294
11. D. Roempler, K. Weissohn: "Kohlenstoff- und Härteverlauf in der Einsatzhärtungsschicht - Zusatzmodul für Diffusionsrechner", HTM (1989), 44/360-365
12. B. Liščić, M. Stupnišek, F. Cajner, T. Filetin: Toplinska obrada, Praktikum, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1992.
13. Katalog Ipsen za programski paket Carb-o-Prof, Ipsen, Kleve, Njemačka, 2000.

ŽIVOTOPIS

Rođena 02.05.1965. u Goršćakima kraj Karlovca, Republika Hrvatska. Završila Matematičko-informatičku srednju školu u Karlovcu, od 1984-1989 studirala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, stekla naslov diplomirane inženjerke strojarstva, diplomirala na Zavodu za materijale, usmjerenje Toplinska obrada. Od 2000. zaposlena u firmi Končar-Alati d.d. na poslovima voditeljice toplinske obrade i menadžerice za ključne kupce, ranije bila zaposlena u tvrtki Dalekovod d.d. na poslovima tehnologa strojne i toplinske obrade. Članica je sljedećih udruženja za materijale i toplinsku obradu: Društva za toplinsku obradu i inženjerstvo površina Hrvatske, američkog ASM International i njemačkog AWT. Bavi se pisanim i konzekutivnim prevođenjem (sa i na engleski i njemački jezik), prevela niz stručnih dokumenata od državnog značaja, aktivna članica Društva znanstvenih i tehničkih prevoditelja Hrvatske.

CURRICULUM VITAE

Born on 02.05.1965. in Goršćaki nearby Karlovac, Republic of Croatia. Attended Mathematical-computer secondary school in Karlovac. From 1984-1989 studied at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb, gained B.Sc. degree in Mechanical Engineering, at Department of Materials, Heat Treatment Section. Since year 2000 has been employed in the company Končar-Alati d.d., as a Head of Heat Treatment Dept and Key Account Manager. Also used to work in the company Dalekovod d.d, as a Technologist for Machining & Heat Treatment processes. A member of Croatian Society for Heat Treatment and Surface Engineering, ASM International and AWT. Active in written and spoken translating (from and to English and Croatian language), translated many highly ranked documents, an active member of Croatian Association of Scientific and Technical Translators.